Библиотека
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

Е. Л. МАРШАК

РЕМОНТ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ



БИБЛИОТЕКА
ЭЛЕКТРОМОНТЕРА

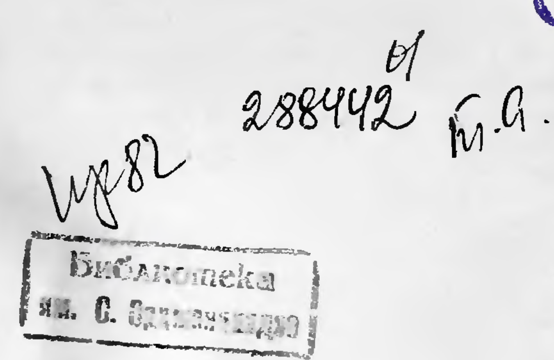
Выпуск 417

Е. Л. МАРШАК

РЕМОНТ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Издание второе,
переработанное и дополненное







«ЭНЕРГИЯ» · МОСКВА · 1975

6П2.1.081
М 30
УДК 621.313.333.045.004.67

Маршак Е. Л.

М 30 Ремонт всыпных обмоток асинхронных двигателей. Изд. 2-е, перераб. и доп. М., «Энергия», 1975.

88 с. с ил. (Б-ка электромонтера. Вып. 417).

Настоящая книга является вторым, переработанным и дополненным изданием книги «Ремонт обмоток статоров электрических машин переменного тока», вышедшей в 1966 г.

В книге рассматриваются схемы, расчеты и технология ремонта всыпных обмоток асинхронных электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт напряжением до 660 В. Приводятся последовательность и режимы технологических операций, описываются ремонтные приспособления и оснастка.

Книга рассчитана на электрообмотчиков и мастеров электроремонтных цехов промышленных предприятий, электростанций, транспорта, связи, сельского хозяйства и других отраслей народного хозяйства.

М $\frac{30307\text{-}274}{051(01)\text{-}75}$ 114-75 6П2.1.081

ПРЕДИСЛОВИЕ

XXIV съезд КПСС определил курс на интенсивное развитие народного хозяйства, наметил дальнейшее продвижение нашего общества по пути коммунистического строительства.

Важнейшую роль в развитии материально-технической базы коммунизма играет электрификация, призванная обеспечить развитие и прогресс всех отраслей нашего народного хозяйства.

Повышение энерговооруженности промышленности связано с увеличением парка электрических машин, и в первую очередь самых распространенных из них — асинхронных электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт.

Непрерывно возрастающая потребность в электродвигателях не может быть удовлетворена увеличением их выпуска электромашиностроительными заводами; большое значение в этом имеет пополнение парка за счет отремонтированных электродвигателей.

В настоящее время ежегодно ремонтируется свыше 3 млн. электродвигателей в указанном диапазоне мощности. Ежегодный прирост количества ремонтируемых электродвигателей составляет около 10%, и, таким образом, через 7—8 лет число ремонтируемых электродвигателей удвоится. Поэтому понятно, сколь важное народнохозяйственное значение имеют техника и экономика ремонта.

Часть электродвигателей ремонтируется в централизованном порядке специализированными заводами, где этот ремонт производится на достаточно высоком техническом уровне, по современной технологии — поточно-узловым методом.

Большая часть (не менее 80%) электродвигателей ремонтируется децентрализованно, непосредственно владельцами электрооборудования, в электроремонтных участках и цехах промышленных предприятий, электростанций, транспорта, связи, сельского хозяйства и других

отраслей народного хозяйства. Их число по стране составляет несколько десятков тысяч. Только в Москве и Московской области свыше тысячи таких цехов и участков. В этом случае, как правило, технология и организация ремонта недостаточно совершенны, что приводит к снижению эксплуатационной надежности отремонтированных электродвигателей, чрезмерным материальным и трудовым затратам, а также к увеличению длительности нахождения электродвигателей в ремонте.

В настоящей книге описана рациональная технология ремонта всыпных обмоток электродвигателей 0,6—100 кВт в электроремонтных цехах предприятий народного хозяйства с применением проверенных ремонтных приспособлений и современных прогрессивных электроизоляционных материалов и обмоточных проводов. В доступной форме приводятся также краткие сведения по схемам и расчетам обмоток электродвигателей.

Автор будет признателен за критические замечания и пожелания, которые просит направлять по адресу: 113114, Москва, Шлюзовая наб., 10, изд-во «Энергия».

Автор

1. СЕРИИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

До 1951 г. каждый из наших отечественных электромашиностроительных заводов разрабатывал и внедрял свои типы электродвигателей, при одних и тех же мощности, напряжении, частоте (скорости) вращения и исполнении они имели разные конструкцию и установочно-присоединительные размеры.

Многообразны были вид и выполнение обмоток; применялось много марок и большое количество размеров проводов, что, естественно, затрудняло ремонт обмоток.

В 1946—1951 гг. Всесоюзным научно-исследовательским институтом электромеханики (ВНИИЭМ) были разработаны и внедрены в производство асинхронные электродвигатели единой серии мощностью до 100 кВт, напряжением до 500 В, частотой вращения до 750 об/мин в двух основных исполнениях: брызгозащищенном (тип А) и закрытом обдуваемом (тип АО).

Серия разработана в семи габаритах сердечника по две длины в каждом габарите, т. е. имеет четырнадцать типоразмеров. Шкала мощности состоит из 14 ступеней: 0,6—1,0—1,7—2,8—4,5—7,0—10—14—20—28—40—55—75 и 100 кВт. Шкала мощности твердая; ряды мощностей электродвигателей на различные частоты вращения (3000, 1500, 1000 и 750 об/мин) одни и те же и соответствуют приведенному выше ряду.

Типы электродвигателей имеют буквенно-цифровое обозначение. Например, АО61-2 расшифровывается:

А — асинхронный, О — обдуваемый, первая цифра после букв — порядковый номер габарита, вторая цифра — порядковый номер длины сердечника, последняя цифра после дефиса (черточки) — число полюсов.

Таким образом, указанный выше тип электровигателя означает: асинхронный электродвигатель трехфазного тока в закрытом — обдуваемом исполнении, с сердечником шестого габарита и первой длины, двухполюсный.

В электродвигателях 3—5-го габаритов применена однослойная обмотка статора, а в электродвигателях 6—9-го габаритов — двухслойная и однослойная. Все электродвигатели серии с полузакрытыми пазами имеют всыпные обмотки из круглого провода.

В элекродвигателях старых выпусков при мощности, превышающей 20—25 кВт, как правило, обмотки выполнены шаблонными жесткими катушками (секциями), проводом прямоугольного сечения. Ремонт таких обмоток сложней и более трудоемок, чем всыпных, требует много ремонтных приспособлений.

Однако электродвигатели первой единой серии А и АО, будучи по своим эксплуатационным параметрам несравненно более совершенными, чем электродвигатели старых выпусков, вскоре перестали удовлетворять возросшим потребностям промышленности.

Достижения в области производства электроизоляционных, главным образом синтетических материалов, и обмоточных проводов обусловили возможность разработки и изготовления новой, более совершеннoй серии электродвигателей.

В 1957—1959 гг. была разработана и пущена в производство новая серия электродвигателей А2 и АО2, имеющая повышенные технико-экономические показатели при более низком расходе активных и конструкционных материалов.

Серия электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт состоит из 1—9-го габарита, по две длины в каждом габарите, т. е. имеет 18 типоразмеров. Электродвигатели 1—5-го габаритов имеют закрытое обдуваемое исполнение (АО2), а 6—9-го габаритов — защищенное (А2) и закрытое обдуваемое.

В сериях А2 и АО2 применена однослойная обмотка для всех электродвигателей 1-го и 2-го габаритов и для электродвигателей 3-го и 4-го габаритов серии АО2.

Для всех остальных электродвигателей этой серии применена двухслойная обмотка. Обмотки всыпные из круглого провода.

В настоящее время для обеспечения высокого технического уровня и конкурентоспособности отечественного производства разработана и внедряется серия электродвигателей 4А, имеющая более широкую унификацию узлов и деталей и меньшие габариты.

На компактности конструкции в значительной степени сказалось применение более тонких и более теплостойких материалов для пазовой изоляции и для изоляции обмоточных проводов.

По своим техническим и экономическим показателям, а также по степени эксплуатационной надежности электродвигатели этой серии не уступают лучшим зарубежным образцам.

Обмоточные провода. Обмотки статора в электродвигателях старых выпусков (до внедрения электродвигателей единых серий) выполнялись из провода марки ПБД, имеющего очень большую толщину изоляции, значительно снижающую коэффициент заполнения паза и тем самым ухудшающим использование электродвигателя.

Обмотка электродвигателей первой единой серии в заводском исполнении выполнена проводами марок:

ПЭЛБО — для электродвигателей серии А 3—9-го габаритов и серии АО 3—5-го габаритов;

ПСД — для электродвигателей серии АО 6—9-го габаритов.

В электродвигателях второй единой серии А2 и АО2 применены провода марок:

ПЭТВ — для электродвигателей 1—9-го габаритов при нормальном исполнении и 1—5-го габаритов при влагоморозостойком и тропическом исполнениях;

ПСДТ — для электродвигателей 1—9-го габаритов при химостойком исполнении;

ПСД — для электродвигателей 6—9-го габаритов при влагоморозостойком и тропическом исполнениях.

В электродвигателях серии 4А применен провод марки ПЭТ-155. Наряду с указанным, в электродвигателях этой серии с высотой оси вращения 56—132 мм применяют обмоточные провода марок ПЭТВ и ПЭТВЭМ.

Для выводов обмотки применяют гибкие (составленные из тонких проволок) провода с эластичной изоляцией, обладающие высокой механической и электрической прочностью и достаточной стойкостью к воздействию пропиточных лаков и растворителей. К этим проводам предъявляется требование, чтобы эластичность и стойкость их изоляции сохранялись после воздействия высокой температуры при сушке и пропитке обмоток.

В электродвигателях старых выпусков для выводов применялся провод с резиновой изоляцией, пропитанной

противогнилостным составом, марки ПРГ, обладающий большой гибкостью, эластичностью и высокой электрической прочностью. Существенный недостаток этого провода — очень низкая нагревостойкость (в пределах 65°С), из-за чего его в настоящее время стараются по возможности не применять даже для электродвигателей с классом нагревостойкости изоляции А.

В электродвигателях единых серий для выводов применяют провода марок:

ПРГ, ПРГБ и ЛПРГС для класса нагревостойкости А;

ЛПЛ и ПВПО для класса нагревостойкости Е;

ПАЛ-130 и ПВБЛ для класса нагревостойкости В; РГКМ, ПЭТЛ-200, ПАЛ-180, ПВКФ и ПВФС для класса нагревостойкости F и Н.

Наряду с указанными проводами разрабатываются и внедряются провода новых марок с более совершенными механическими и электрическими качествами.

Пазовая изоляция (пазовая коробка) электродвигателей старых выпусков и серий А и АО выполняется заводами-изготовителями из двух слоев электроизоляционного картона толщиной по 0,2 мм и проложенного между ними слоя лакоткани толщиной 0,2 мм. В качестве равноценного заменителя применяют коробку, скомплектованную из двух слоев пленкоэлектрокартона толщиной 0,27—0,3 мм, представляющего собой гибкий материал, состоящий из электроизоляционного картона, оклеенного с одной стороны полиэтилентерефталатной или триацетатной пленкой.

Для более ответственных и особенно для электродвигателей серии А и АО нагревостойкого исполнения один слой электрокартона заменяют гибким миканитом или гибким слюдинитом, а вместо лакоткани применяют стеклолакоткань или лавсановую пленку.

В электродвигателях серии АО2 1—5-го габаритов нормального исполнения пазовая изоляция выполнена из одного слоя пленкоэлектрокартона толщиной 0,27 мм на полиэтилентерефталатной пленке, а в электродвигателях 6—9-го габаритов — из электронита толщиной 0,2 мм в сочетании с гибким миканитом ГФС толщиной 0,2 мм и стеклолакотканью ЛСП толщиной 0,15 мм. При тропическом и влагоморозостойком исполнениях пазовую изоляцию электродвигателей 1—5-го габаритов комплектуют из стекломиканита Г₁ ФГI толщиной 0,22 мм и стек-

лолакоткани ЛСП толщиной 0,11 мм, а 6—9-го габаритов—из стекломиканита класса нагревостойкости F марки $Г_2ФЭI$ толщиной 0,3 мм и стеклолакоткаии ЛСП толщиной 0,11 мм.

В электродвигателях серии А2 6—9-го габаритов пазовая изоляция выполнена из двух слоев пленкоэлектрокартона толщиной 0,27 мм на полиэтилентерефталатной пленке.

В электродвигателях новой серии 4А для пазовой изоляции применены более тонкие и теплостойкие синтетические материалы с повышенной электрической и механической прочностью.

При нормальном исполнении и высоте оси вращения электродвигателя 56—132 мм эту изоляцию выполняют из пленки ПЭТФ толщиной 0,2—0,25 мм или из одного-двух слоев пленки изофлекс 2—0,2 мм. При высоте вращения электродвигателя 160—250 мм применяют композиционный материал тривольтерм толщиной 0,36—0,38 мм или пленколакослюдопласт ГИП-ЛСП-ПЛ толщиной 0,4 мм.

Междуслойные прокладки в пазах (для двухслойных обмоток), прокладки под клиньями и междуфазовые прокладки в лобовых частях стремятся выполнять из тех же материалов, что и пазовую изоляцию с целью использования отходов, получающихся при раскрое материалов для пазовых коробок. В случаях, когда эта изоляция двух- или трехслойная, слои проклеиваются между собой.

В электродвигателях серии АО2 тропического и влагоморозостойкого исполнения 1—9-го габаритов, серии АО2 6—9-го габаритов нормального исполнения и серии 4А прокладки под клинья выполнены из стеклотекстолита марки СТ и СТЭФ.

Изоляция выводов катушек, междукатушечных соединений и паек электродвигателей тропического и влагоморозостойкого исполнений серий АО2 1—9-го габаритов и серии АО2 6—9-го габаритов нормального исполнения выполнена электроизоляционными трубками марки ТКС. В остальных электродвигателях серии А2 и АО2 наряду с указанными применяют трубки марок ТЭЛ, ТЭС и ТКВ. В электродвигателях серии 4А применены более теплостойкие и эластичные трубки марок ТКСП и ТКСГ.

Бандажировка лобовых частей обмоток электродвигателей старых выпусков серий А и АО, серии АО2 1—5-го

Таблица 1

Класс нагревостойкости	Пропиточный лак		Покровная эмаль	
	Марка	Характеристика	Марка	Характеристика
А и Е	МЛ-92	Алкидно-меламиновый лак печной сушки	ГФ-92ХС (быв. СВД)	Глифтале-масляная эмаль серого цвета воздушной сушки
	МГМ-8	Смесь масляно-алкидного пропиточного лака печной сушки ГФ-95 и меламиноформальдегидной смолы К-421-02 в соотношении масс 92:8 или лаков ГФ-95 и МЛ-92 в равных массах	ГФ-92ХК (быв. КВД)	То же красного цвета
			ГФ-92ГС (быв. СПД)	Глифтале-масляная эмаль серого цвета печной сушки
В	МЛ-92	Алкидно-меломиновый лак печной сушки	ГФ-92ГС (быв. СПД)	Глифтале-масляная эмаль серого цвета печной сушки
	МГМ-8	Смесь масляно-алкидного пропиточного лака печной сушки ГФ-95 и меламиноформальдегидной смолы К-421-02 в соотношении масс 92:8 или лаков ГФ-95 и МЛ-92 в равных массах		
F	ПЭ-933	Полиэфирно-эпоксидный термореактивный лак печной сушки	ЭП-91, ЭП-92	Эпоксидная покровная эмаль (суспензия пигментов в эпоксидном лаке)
	МГМ-8	Смесь масляно-алкидного пропиточного лака печной сушки ГФ-95 и меламиноформальдегидной смолы К-421-02 в соотношении масс 92:8 или лаков ГФ-95 и МЛ-92 в равных массах	ГФ-92ГС (быв. СПД)	Глифтале-масляная эмаль печной сушки

Класс нагревостойкости	Пропиточный лак		Покровная эмаль	
	Марка	Характеристика	Марка	Характеристика
Н	К-47к	Кремнийорганический лак (раствор полиметилфенилсилоксановой смолы, модифицированной полиэфиром в органических растворителях)	ПКЭ-19, ПКЭ-22	Кремнийорганическая эмаль, нагревостойкая, низкотемпературной сушки

габаритов нормального исполнения и серии А2 6—9-го габаритов выполнена преимущественно хлопчатобумажным крученым шнуром. В остальных электродвигателях серии АО2 нормального, тропического и влагоморозостойкого исполнений бандажировка лобовых частей выполнена стеклочулком марки АСЭЧ(б), в электродвигателях серии 4А — стеклочулком АСЭЧ(б) и крученой полиэфирной нитью.

Пазовые клинья электродвигателей старых выпусков, серий А и АО, серии АО2 1—5-го габаритов и серии А2 6—9-го габаритов изготовлены из сухого дерева твердых пород. В электродвигателях серии АО2 6—9-го габаритов клинья прессуются из прессматериала АГ-4. В электродвигателях серии АО2 1—9-го габаритов тропического и влагоморозостойкого исполнения применен стеклотекстолит марки СТЭФ. Клинья электродвигателей серии 4А прессуют из теплостойких пластичных материалов — пленок ПТЭФ, изофлекса 2, триволтерма.

Лаки и покровные эмали, применяемые в электромашиностроении для пропитки и последующего наружного (защитного) покрытия обмоток, непрерывно совершенствовались по мере их разработки, а также внедрения новых более прогрессивных материалов и обмоточных проводов.

Вид пропиточного лака определяется не только его электрической и механической прочностью, теплостойкостью, влагоморозостойкостью и другими физико-техническими свойствами, но также характером воздействия на изоляцию проводов и отчасти на электроизоляционные материалы.

Наиболее распространенные пропиточные лаки и покровные эмали, применяемые заводами-изготовителями для всыпных обмоток в зависимости от класса нагревостойкости, приведены в табл. 1.

2. СХЕМЫ ОБМОТОК

Исходным элементом, из которого составляется схема обмотки, является катушка, состоящая из одного или нескольких последовательно соединенных витков. *Витком* является элемент, состоящий из двух последовательно соединенных между собой проводников, расположенных под соседними разноименными полюсами. Проводники, образующие виток, могут быть подразделены на несколько параллельных проводов. К подразделению витка прибегают для удобства намотки во избежание применения грубого провода большого сечения.

Части катушки, лежащие в пазах сердечника стали, являются пазовыми или *активными частями катушки*, так как они пронизываются магнитным потоком и непосредственно участвуют в создании э. д. с. Проводники, лежащие вне пазовой части и служащие для соединения между собой активных частей катушки, называются *лобовыми частями катушки*.

Катушка помимо определенного числа витков характеризуется также своим шагом, т. е. числом пазовых делений, заключенных между центрами пазов, в которые закладываются стороны катушки.

Шаг катушки y называют диаметральным, если он равен полюсному делению τ. В этом случае

$$y = \tau = \frac{Z}{2p},$$

где Z — число пазов статора; $2p$ — число полюсов обмотки.

Полюсное деление (см) представляет длину части окружности расточки статора, приходящуюся на долю одного полюса:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p},$$

где D — диаметр расточки статора, см.

В двухполюсной электрической машине центральный угол, соответствующий полюсному делению, состав-

ляет 180°, в четырехполюсной 90°, в шестиполюсной 60° и т. д.

При составлении схем обмоток принято при любом числе полюсов электродвигателя считать угол, соответствующий полюсному делению, равным 180 эл. град.

Тогда число электрических градусов в окружности расточки электрической машины с любым числом полюсов будет равно $180 \cdot 2p$.

Шаг катушки может быть несколько меньше диаметрального, в этом случае его называют укороченным.

Укорочение шага катушки (обмотки) характеризуется *коэффициентом укорочения*

$$k_y = \frac{y}{\tau},$$

где y — укороченный шаг обмотки.

Несмотря на то что укорочение шага влечет за собой уменьшение э. д. с., индуктируемой в катушке (так как обе стороны витка при укороченном шаге не могут одновременно находиться под центрами соседних полюсов), оно широко применяется в двухслойных обмотках, так как помимо экономии меди на длине лобовых частей улучшает электрические свойства электродвигателя и облегчает укладку катушек в пазы.

В различных типах обмотки применяется укорочение шага обычно 0,85—0,75, реже до 0,66, а в отдельных случаях и до 0,5.

Характерным показателем обмотки электродвигателя является *число пазов на полюс и фазу* q. Это число показывает, сколько катушечных сторон каждой фазы приходится на один полюс обмотки. Поскольку катушечные стороны одной фазы, лежащие под двумя соседними полюсами обмотки, образуют катушечную группу, то число q показывает, из скольких катушек состоят катушечные группы данной обмотки. Таким образом,

$$q = \frac{Z}{2pm}$$

где m — число фаз обмотки.

Для рассматриваемых нами трехфазных обмоток

$$q = \frac{Z}{6p}.$$

Для вышеприведенного примера, где $Z=60$, а $2p=4$,

$$q = \frac{60}{6 \cdot 2} = 5.$$

Если же статор этой машины использовать для изготовления восьмиполюсной машины, то

$$q=\frac{60}{6\cdot 4}=2{,}5,$$

т. е. число пазов на полюс и фазу будет дробным.

Так как число катушек в каждой отдельной катушечной группе может выражаться только целым числом, то при дробном q катушечные группы не одинаковы — содержат разное число катушек, т. е. дробное q определяет среднее число катушек, содержащихся в катушечных группах.

Из условий симметрии обмотки следует, что все три ее фазы должны иметь одинаковое количество катушек, симметрично расположенных по окружности сердечника стали. Именно в этом случае суммарные э. д. с. фаз обмотки будут равны по величине и сдвинуты между собой на 120 или 240°.

Катушки должны быть соединены в катушечные группы, а последние — в фазы так, чтобы обеспечить необходимое количество полюсов обмотки и правильное их чередование.

Катушки внутри катушечной группы соединяются между собой всегда последовательно, а катушечные группы в фазе могут быть соединены последовательно, параллельно или смешанным способом (последовательно-параллельно). Основным правилом при пересоединении последовательной обмотки в параллельную или смешанную является сохранение направления тока в катушечных группах таким же, как это имело бы место при последовательном соединении, в котором направление токов определяется чередованием полюсности обмотки.

На схеме требуется указать способ соединения фаз обмотки в звезду или в треугольник. Каким из этих способов должны быть соединены фазы, определяют расчетом обмотки.

Для одного и того же номинального напряжения для различных машин могут применяться как один, так и другой способ. Само соединение фаз может быть выполнено как внутри машины, глухо, так и при помощи перемычек на специальном щитке, вынесенном на корпус машины. Последний способ удобен тем, что позволяет более четко проводить профилактические испытания обмотки в процессе эксплуатации, так как начала и

концы всех фаз могут быть свободно присоединены к испытательной аппаратуре.

Очень часто электродвигатели бывают пригодны для работы на любом из двух номинальных напряжений, находящихся в соотношении $1:\sqrt{3}$, например, 127 и 220 В, 220 и 380 В или 380 и 660 В; тогда при меньшем из этих двух напряжений его фазы должны быть соединены в треугольник, а при большем в звезду.

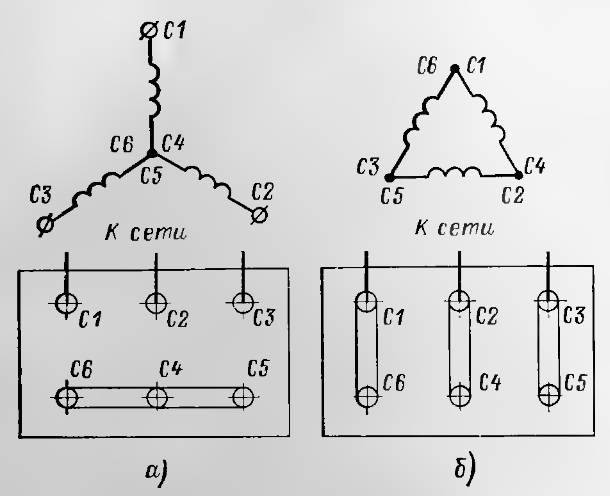


Рис. 1. Соединение фаз обмотки электродвигателя напряжением 220/380 В.

а — в звезду на 380 В; *б* — в треугольник на 220 В.

На рис. 1 показаны принципиальные схемы соединения фаз обмотки и соответствующие этим соединениям переключения, производимые на внешнем щитке для асинхронного двигателя на номинальные напряжения 220/380 В.

Обмотки электродвигателей подразделяются на *петлевые* и *волновые*. Петлевые обмотки, как правило, используются для статоров, а волновые — для фазных роторов асинхронных двигателей.

Как петлевые, так и волновые обмотки могут быть *однослойные и двухслойные.*

При однослойной обмотке каждая сторона катушки занимает весь паз, при двухслойной обмотке сторона катушки занимает по высоте только половину паза,

т. е. в каждый паз закладываются две стороны катушки, образуются два слоя обмотки.

Из сказанного следует, что при однослойной обмотке число катушек равно половинному числу пазов, а при двухслойной — полному числу пазов.

Основными недостатками однослойных обмоток по сравнению с двухслойной являются увеличенный (доходящий до 20%) расход меди и ограниченные возможности построения схемы обмотки с укороченным шагом и с дробным q для наиболее распространенного вида однослойных обмоток — концентрических.

Указанные недостатки однослойных обмоток ограничивают их применение, с другой стороны, однослойные обмотки позволяют существенно повысить коэффициент заполнения паза из-за отсутствия изоляционного слоя между катушками, в середине паза.

Перед тем как перейти непосредственно к рассмотрению схем обмоток, следует обусловить приемы изображения схем на чертежах.

Чертеж схемы в условном виде представляет собой развертку окружности статора или ротора на плоскости. Пазы и стороны уложенных в них катушек изображают прямыми линиями. Схемы двухслойных обмоток в пазовой части изображают двумя рядом расположенными линиями — сплошной и пунктирной, причем сплошная линия обозначает сторону катушки, уложенную в верхнюю часть паза, а пунктирная линия — нижнюю сторону катушки, уложенную на дно паза. Нижний и верхний слой лобовых частей изображают соответственно пунктирными и сплошными линиями.

Стрелки на элементах обмотки, проставленные на некоторых схемах, показывают направление э. д. с. или токов в соответствующих элементах обмотки в определенный (один и тот же для всех фаз обмотки) момент времени.

Начала и концы фаз обмотки статора обозначают: начало 1-й фазы *C1*, 2-й фазы *C2*, 3-й фазы *C3*; конец 1-й фазы *C4*, 2-й фазы *C5*, 3-й фазы *C6*.

Для составления схемы обмотки помимо указания ее вида должны быть даны определяющие ее параметры: Z — число пазов; $2p$ — число полюсов; y — шаг обмотки по пазам; a — число параллельных ветвей в фазе; $\curlyvee$ (звезда) или $\triangle$ (треугольник) — способы соединения фаз.

ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ

Однослойные обмотки подразделяются на *концентрические* и *шаблонные*.

На рис. 2 (см. вклейку между стр. 32 и 33) представлена трехфазная схема однослойной *концентрической* обмотки статора для четырехполюсного электродвигателя, число пазов которого $Z=36$ и фазы обмотки соединены в звезду.

При составлении схемы руководствуются следующими соображениями.

Полюсное деление составляет

$$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{36}{4}=9.$$

Число пазов на полюс и фазу равно

$$q=\frac{Z}{2pm}=\frac{36}{4\cdot 3}=3.$$

В соответствии с этим первую катушечную группу, состоящую из трех катушек, закладывают левыми сторонами катушек в пазы *1*, *2* и *3*, а правыми сторонами — в пазы *10*, *11* и *12*. Началом первой фазы *C1* принимают вывод из левой стороны катушки, заложенной в паз *1*. Заключенные между сторонами первой катушечной группы пазы *4—9*, а также пазы *13—18* займут катушки двух других фаз. Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет левыми сторонами катушек пазы *19*, *20* и *21*, а правыми сторонами пазы *28*, *29* и *30*.

Для правильного образования полюсов в однослойных обмотках (кроме обмоток, выполненных «вразвалку»), т. е. в обмотках, где число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов, они должны соединяться разноименными концами (конец первой катушечной группы с началом второй, конец второй катушечной группы с началом третьей и т. д.).

Исходя из этого, соединяют между собой концы катушек, выходящие из пазов *10* и *19*. При этом соединении двух катушечных групп оставшийся свободным вывод из правой стороны катушки, заложенной в паз *28*, является выводным концом первой фазы *C4*.

Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы обычно на 120 эл. град., т. е. на ²/₃ полюсного деле-

2—980

ния. Здесь же следует отметить, что этот сдвиг может быть произведен также на число электрических градусов, равное $120+360n$, где n — любое целое число, и только в целях концентрации всех выводов на одном участке обмотки их сдвигают на минимально возможное расстояние, на 120 эл. град.

Начало второй фазы *C2* должно быть сдвинуто на $^2/_3\tau$, т. е. на $^2/_3 \times 9 = 6$ пазов, т. е. располагается в $1+6=7$-м пазу.

Следовательно, первая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы *7*, *8* и *9*, а правыми сторонами — пазы *16*, *17* и *18*. Пазы *19—24* займут катушки других фаз, а вторая катушечная группа второй фазы займет левыми сторонами катушек пазы *25*, *26* и *27* и правыми сторонами пазы *34*, *35* и *36*.

Катушечные группы второй фазы соединяют между собой концами катушек, выходящих из пазов *16* и *25*. Оставшийся свободным вывод из правой стороны катушки, заложенный в паз *34*, является выводным концом второй фазы *C5*.

Начало третьей фазы *C3*, сдвинутое от начала второй фазы на $^2/_3$ полюсного деления, располагают в пазу *13*.

В первой катушечной группе третьей фазы левые стороны катушек займут пазы *13*, *14* и *15*, а правые стороны — пазы *22*, *23* и *24*. Вторая катушечная группа этой фазы располагается левыми сторонами катушек в пазах *31*, *32* и *33* и правыми сторонами в пазах *4*, *5* и *6*. Соединяют между собой катушечные группы концами, выходящими из пазов *22* и *31*. Свободный вывод, выходящий из правой стороны катушки, заложенной в паз *4*, является выводным концом третьей фазы *C6*.

Для соединения фаз в звезду соединяют выводы *C4*, *C5* и *C6*.

Чтобы проверить правильность образования полюсов, следует указать стрелками направление токов на входных концах фаз *C1*, *C2* и *C3*.

Как следует из векторной диаграммы фазных токов трехфазной системы, в любой момент времени направление тока в начале одной из фаз обмотки всегда противоположно направлению токов в началах двух других фаз.

Сообразуясь с этим, проставляют на линии пазов стрелки, показывающие направление тока в сторонах катушек, что и определит правильность образования полю-

сов в обмотке — их число и чередование, а также правильность соединения фаз между собой.

В однослойной концентрической обмотке шаги катушек в катушечной группе разные: в наружной (самой большой) катушке шаг составляет $4q-1$, а во внутренней (самой малой) шаг равен $2q+1$.

Средний же шаг всех катушек, входящих в катушечную группу, который является расчетным при определении э. д. с. обмотки, составляет:

$$\frac{(4q-1)+(2q+1)}{2}=3q=\frac{Z}{2p},$$

т. е. является диаметральным.

В некоторых электродвигателях старых выпусков напряжением 500 В с однослойной всыпной обмоткой, а также в близкой к ней по конструкции так называе-

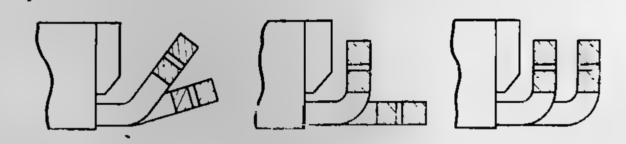


Рис. 3. Расположение лобовых частей двухплоскостной концентрической обмотки.

мой «протяжной» обмоткой применялась дополнительная изолировка лобовых частей каждой катушечной группы, и они различались по способу расположения лобовых частей. Обмотку, изображенную на рис. 2, называют двухплоскостной, так как в ней лобовые части расположены в двух плоскостях. Возможные виды взаиморасположения лобовых частей 1-й и 2-й плоскостей указаны на рис. 3.

В однослойной обмотке число катушечных групп в фазе равно числу пар полюсов p; следовательно, число катушечных групп всей обмотки будет $3p$, т. е. $3p/2$ малых (1-й плоскости) катушечных групп и $3p/2$ больших (2-й плоскости) катушечных групп. Число $3p/2$ может быть целым тогда, когда p четное, т. е. когда число полюсов обмотки $2p$ равно 4, 8, 12, 16 и т. д. Это значит, что только при числе полюсов машины из указанного ряда вся двухполюсная обмотка может быть распределена на три фазы с равным числом больших и малых катушечных групп в каждой фазе, как это имело место в обмот-

2*

ке, приведенной на рис. 2, или в обмотке, приведенной на рис. 4 для восьмиполюсной машины (см. вклейку между стр. 32 и 33).

В том же случае, когда число пар полюсов машины нечетное, т. е. $2p$ равно 6, 10, 14, 18 и т. д., двухплоскостная обмотка не может быть распределена по фазам с одинаковым количеством больших и малых катушечных групп. Она должна иметь так называемую «переходную» катушечную группу, как бы наполовину находящуюся в первой плоскости, наполовину — во второй. Схема такой обмотки для шестиполюсной машины приведена на рис. 5 (см. вклейку между стр. 32 и 33).

Если еще раз обратиться к рис. 2 и 4, то легко установить, что обмотка на рис. 2 имеет последовательное соединение катушечных групп в фазе, а обмотка на рис. 4 — соединение в две параллельные ветви. По общему принципу образования параллельных ветвей последние должны иметь одинаковые индуктивные и активные сопротивления для обеспечения равенства проходящих по ним токов. Следовательно, обмотка, изображенная на рис. 2, при соединении в две параллельные ветви имела бы неодинаковые активные сопротивления, так как в одну параллельную ветвь входила бы малая катушечная группа, а в другую — большая с разными длинами лобовых частей и, следовательно, разными активными сопротивлениями. Что касается схемы, изображенной на рис. 4, то здесь в каждую параллельную ветвь входит по одной малой и одной большой катушечной группе и, следовательно, соблюден принцип одинаковости активных сопротивлений. Если же эту обмотку соединить в четыре параллельные ветви, то этот принцип был бы нарушен, обмотка получалась бы с разными активными сопротивлениями в параллельных ветвях.

Следует заметить, что в асинхронных электродвигателях активное сопротивление фазы обмотки составляет обычно не более 10—12% полного сопротивления, которое в основном зависит от индуктивного сопротивления. И если учесть, что за счет различной длины прямолинейных вылетов большой и малой катушечных групп разница в их активных сопротивлениях будет также примерно 10—12%, то разница в полных сопротивлениях параллельных ветвей (при условии равенства их индуктивных сопротивлений) и, следовательно, токов в них составит около 1%, что практически не может повлиять на работу

электродвигателя. Это положение служит объяснением применения для двухполюсных электродвигателей трехплоскостных обмоток с различными длинами катушечных групп в фазах и соответственно различными активными сопротивлениями фаз обмотки (см. рис. 7).

На рис. 6 изображена схема обмотки для четырехполюсного электродвигателя, точно такого же, для которого была ранее представлена схема на рис. 2. Различие этих схем состоит в том, что обмотка на рис. 6 (см. вклейку между стр. 32 и 33) состоит из одинаковых катушечных групп («равнокатушечная»). При соединении этой обмотки в две параллельные ветви не будет разницы в активном сопротивлении параллельных ветвей и если в обыкновенной однослойной обмотке число видов катушек будет равно 2 q, то в равнокатушечной обмотке это число будет только q.

На рис. 7 представлена иногда применявшаяся для электродвигателей старых выпусков, для двухполюсных машин схема трехплоскостной обмотки (лобовые части обмотки располагаются в трех плоскостях). Как видно из рис. 7 (см. вклейку между стр. 32 и 33), лобовые части первой фазы обмотки располагаются только в 1-й плоскости, второй фазы — только во 2-й плоскости и третьей фазы — только в 3-й плоскости.

Таким образом, как об этом уже упоминалось, активные сопротивления фаз в этой обмотке различны. Другой особенностью этой схемы является то, что катушечная группа, состоящая из шести катушек ($q=6$), разбита на две концентрические полугруппы по три катушки в каждой, т. е. катушечная группа как бы развалена надвое. Отсюда такую обмотку часто называют намотанной «вразвалку».

Способ намотки «вразвалку» применяют для электродвигателей с большим числом полюсов при числе пазов на полюс и фазу q, равном шести или восьми и реже при q, равном четырем. Обмотка со сравнительно большим числом q, спроектированная «вразвалку», дает возможность уменьшить радиальные размеры корпуса электродвигателя за счет небольшого увеличения ее аксиальных размеров, что в результате приводит к снижению общей массы электродвигателя.

Основные положения, которыми следует руководствоваться при составлении схемы однослойной концентрической обмотки, следующие:

1. Исходя из технологических условий заготовки и укладки катушек, а также условий эксплуатации электродвигателя, выбирают тип обмотки (двух- или трехплоскостная, разно- или равнокатушечная).

2. Определяют число катушек в катушечной группе, равное числу q.

3. Определяют шаг катушек по пазам. Шаг большой (внешней) катушки в катушечной группе равен $4\ q-1$. Например, в обмотке с $q=4$ шаг внешней катушки равен 15, или, как принято обозначать, шаг 1—16. Шаг каждой следующей внутренней катушки уменьшается на два пазовых деления, т. е. составит 1—14, 1—12 и 1—10.

4. Определяют, возможно ли соединить проектируемую обмотку в требуемое число a параллельных ветвей. Для этого необходимо, чтобы частное p/a было целым числом.

5. Расставляют направления токов под полюсами, образованными магнитным полем обмотки, соединяя при помощи междукатушечных соединений отдельные катушки в катушечные группы и при помощи междугрупповых — катушечные группы в фазы; при этом выбранное направление тока в фазе должно соответствовать стрелкам во всех катушках фазы.

6. Выбирают катушки, из которых должны выходить начала и концы фаз обмотки. Для проверки правильности определения начал и концов фаз следует воспользоваться правилом о направлении токов в фазах, о котором уже упоминалось.

Шаблонные обмотки можно подразделить на простую шаблонную обмотку, шаблонную обмотку «вразвалку» и цепную обмотку.

На рис. 8 приведена полная развернутая схема простой шаблонной обмотки двухполюсного электродвигателя при $q=3$. Из этой схемы видно, что катушки шаблонной обмотки (это относится ко всем типам шаблонных обмоток) имеют трапецеидальную форму. Одна пазовая часть катушки — длинная, другая — короткая. Лобовые части катушек при этом располагаются в двух плоскостях (см. вклейку между стр. 32 и 33).

Как видно из схемы, образование катушечных групп и фаз обмотки, определение начал и концов фаз производятся так же, как и в концентрической обмотке.

Положительным качеством этой обмотки является то, что все катушки совершенно одинаковы по форме.

Шаблонная обмотка, так же как и концентрическая, может быть выполнена способом «вразвалку». На рис. 9 изображена схема шаблонной обмотки «вразвалку» для двухполюсного электродвигателя при $Z=24$ (см. вклейку между стр. 32 и 33).

Схему на рис. 9 можно рассматривать как промежуточную между шаблонной обмоткой «вразвалку» и так называемой цепной обмоткой. Цепные обмотки также выполняют «вразвалку». Отличие же их от предыдущих обмоток заключается в том, что в них короткие и длинные стороны катушек чередуются, т. е. «развалка» производится не по полугруппам, а по катушкам.

На рис. 10 и 11 представлены схемы цепных обмоток соответственно для шести- и четырехполюсного электродвигателя. Для наглядности эти схемы представлены в виде кольцевой развертки. Рассматривая эти схемы, мы можем заметить, что если короткие стороны катушек лежат в нечетных пазах, то длинные стороны лежат в четных. Но так как каждая катушка состоит из короткой и длинной стороны, то цепную обмотку можно образовать только в том случае, если ее шаг будет нечетным.

Важно также отметить, что обмотки, изображенные на рис. 10 и 11, выполнены с укороченным шагом катушек по пазам. На той и другой схеме шаг равен пяти, в то время как диаметральный шаг этих обмоток равен:

для рис. 10 (см. вклейку между стр. 32 и 33)

$$\frac{Z}{2p}=\frac{36}{6}=6;$$

для рис. 11 (см. вклейку между стр. 32 и 33)

$$\frac{Z}{2p}=\frac{24}{4}=6.$$

Таким образом, цепная обмотка может быть выполнена с укороченным шагом, что дает экономию меди в лобовых частях.

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ С ЦЕЛЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Наибольшее распространение в статорах электродвигателей переменного тока имеют двухслойные петлевые обмотки.

Все катушки двухслойной обмотки одинаковы, что упрощает и удешевляет их изготовление.

Название «двухслойной» обмотка получила потому, что в паз закладываются стороны двух катушек, а каж-

дая катушка располагается на статоре в двух слоях. Один слой обмотки укладывается на дне паза («нижний» слой), а другой — в части паза, прилегающей к расточке статора («верхний» слой). Лобовые части катушки также занимают два слоя, а переход из одного слоя в другой осуществляется в головках катушек.

По своим электрическим признакам двухслойные петлевые обмотки имеют следующие преимущества:

возможность применения катушек с любым укорочением шага, причем шаг катушки может быть как четным, так и нечетным;

сравнительно несложное выполнение обмотки с числом пазов на полюс и фазу любой дробности;

возможность применения разновитковых катушек для полного использования площади пазов статора, если в результате электромагнитного расчета окажется, что полное число активных проводников в пазу должно быть нечетным.

Перечисленные качества двухслойной петлевой обмотки обеспечивают преимущественное применение ее для статоров асинхронных электродвигателей.

В качестве примера, пользуясь принятыми нами ранее условными графическими и буквенными обозначениями, приводится схема двухслойной обмотки со следующими параметрами (рис. 12): $2p=8$; $Z=48$; $y=5$; $a=1$ (см. вклейку между стр. 32 и 33).

Так как диаметральный шаг этой обмотки, равный полюсному делению,

$$\tau=\frac{Z}{2p}=\frac{48}{8}=6,$$

то коэффициент укорочения обмотки

$$k_y=\frac{y}{\tau}=\frac{5}{6}.$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q=\frac{Z}{2pm}=\frac{48}{8\cdot 3}=2.$$

В соответствии с этим 1-ю катушечную группу, состоящую из двух катушек, закладывают верхними сторонами катушек в пазы, условно обозначенные *1* и *2*, нижними сторонами в пазы *6* и *7*.

Началом первой фазы *С1* принимают вывод катушки из верха первого паза.

Верх пазов *3, 4, 5* и *6* и низ пазов *8, 9, 10* и *11* займут соответственно катушечные группы других двух фаз.

Таким образом, следующая катушечная группа первой фазы займет своими верхними сторонами пазы *7* и *8*, а нижними — пазы *12* и *13*.

Остальные катушечные группы первой фазы займут: верхними сторонами катушек пазы *13* и *14*, *19* и *20*, *25* и *26*, *31* и *32*, *37* и *38*, *43* и *44*, нижними сторонами катушек пазы *18* и *19*, *24* и *25*, *30* и *31*, *36* и *37*, *42* и *43*, *48* и *1*.

Для правильного образования полюсов катушечные группы при последовательном соединении (в нашем случае $a=1$) соединяют между собой одноименными выводами. При соединении таким способом всех катушечных групп первой фазы получится свободный вывод из верха катушки, заложенной в паз *43*. Этот вывод и является выводным концом первой фазы *С4*.

Начало второй фазы сдвигают от начала первой фазы, если q — целое число, на 120 эл. град., или на $^2/_3$ полюсного деления.

Так как полюсное деление $\tau=6$, то начало второй фазы сдвигают на $^2/_3 \cdot 6=4$ паза, т. е. располагают в 5-м пазу (1+4).

Аналогично этому начало третьей фазы располагают в пазу *9*.

Концы второй и третьей фазы, также сдвинутые от конца первой фазы на $^2/_3\tau$, находятся соответственно в пазах *47* и *3*.

Обращает на себя внимание, что в одном пазу каждого полюса (пазы *6, 12, 18* и т. д.) имеет место встречное направление токов в верхней и нижней сторонах катушек. Это является следствием принятого укорочения шага обмотки на один паз. (Принят шаг, равный пяти, по сравнению с диаметральным шагом, равным шести.)

При укорочении на два паза по отношению к диаметральному встречное направление токов будет уже в двух пазах каждого полюса. В этом легко убедиться, если составить схему, отличающуюся от приведенной на рис. 12 только шагом обмотки 1—5 (вместо 1—6), и обозначить стрелками направления токов во всех элементах обмотки.

При диаметральном шаге обмотки не будет встречных направлений токов в одном и том же пазу.

Как указывалось, в зависимости от расчетных данных катушечные группы в фазе могут быть соединены

между собой последовательно или параллельно (в две или несколько параллельных ветвей).

На рис. 13 (см. вклейку между стр. 32 и 33) приведена схема обмотки с параметрами, аналогичными параметрам обмотки на рис. 12, но при соединении катушечных групп в две параллельные ветви ($a=2$).

Возможное число параллельных ветвей a обмотки с целым числом пазов на полюс и фазу определяется требованием, по которому отношение $2p/a$ должно выражаться целым числом, так как указанное отношение равно числу катушечных групп, приходящихся на каждую параллельную ветвь, а это число, естественно, не может быть дробным. Отсюда следует, что число параллельных ветвей может быть равно 1; 2; p и $2p$ при любом числе полюсов машины.

Число параллельных ветвей может быть равно $p/2$, $p/3$, $p/4$, ..., p/n только в обмотках, число полюсов которых делится соответственно на 4, 6, 8, ..., $2n$, т. е. число параллельных ветвей может быть равно:

$p/2$ для обмоток, имеющих 4, 8, 12, 16 полюсов и т. д.

$p/3$ для обмоток, имеющих 6, 12, 18, 24 полюсов и т. д.

$p/4$ для обмоток, имеющих 8, 16, 24, 32 полюсов и т. д.

$p/5$ для обмоток, имеющих 10, 20, 30, 40 полюсов и т. д.

$p/6$ для обмоток, имеющих 12, 24, 36, 48 полюсов и т. д.

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ С ДРОБНЫМ ЧИСЛОМ ПАЗОВ НА ПОЛЮС И ФАЗУ

Выше упоминалось, что одним из важнейших преимуществ двухслойной петлевой обмотки является практическая возможность выполнения обмотки с числом пазов на полюс и фазу любой дробности.

Представим себе такой случай. Асинхронный электродвигатель с параметрами обмотки статора $Z=72$; $2p=12$, $a=1$ при ремонте модернизируется с увеличением мощности за счет повышения его номинальной частоты вращения (синхронной) с $n_c=500$ об/мин ($2p=12$) до $n_c=600$ об/мин ($2p=10$).

До модернизации:

$$q=\frac{Z}{3\cdot 2p}=\frac{72}{3\cdot 12}=2,$$

после модернизаций:

$$q = \frac{72}{3 \cdot 10} = 2^2/_5.$$

Как указывалось, число q определяет число катушек в катушечной группе. Дробное q означает, что в обмотке не все катушечные группы одинаковы. Одни из них состоят из большого числа катушек и называются большими катушечными группами, другие — с меньшим числом катушек, называются малыми.

В общем случае дробное число пазов на полюс и фазу представляется в виде целого числа и правильной дроби:

$$q = b + \frac{c}{d}.$$

Для нашего примера: $b=2$, $c=2$, $d=5$.

При составлении схемы часть катушечных групп комплектуется из $b+1$ катушек (большие катушечные группы), а часть из b катушек (малые катушечные группы). Количество больших и малых катушечных групп в каждой фазе, а следовательно, и во всей обмотке определяется дробной частью (c/d) числа q. В применении к выбранному нами примеру на каждые $d=5$ катушечных групп во всей обмотке (также и в фазе) приходится $c=2$ больших катушечных групп, состоящих из $b+1=3$ катушек и $d-c=3$ малых катушечных групп, состоящих из $b=2$ катушек.

Для выполнения схемы обмоток остается только определить порядок чередования больших и малых катушечных групп по окружности статора.

Так как на каждые d катушечных групп по всей окружности статора будет приходиться c и $d-c$ соответственно больших и малых, то первые d катушечных групп называют периодом чередования и записывают (по данным нашего примера): (2 3 2 3 2); или в любом другом распределении: (2 2 2 3 3), (2 3 3 2 2), (3 2 2 2 3) и т. д.

Выбрав какое-либо распределение для периода чередования, повторяют его столько раз, сколько число d содержится в полном количестве катушечных групп всей обмотки, т. е. $\frac{3 \cdot 2p}{d}$ раз. Для выбранного нами примера период чередования повторяется $\frac{3 \cdot 10}{5} = 6$ раз,

и полное чередование катушечных групп по окружности статора примет вид:

(2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2),

(2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2), (2 3 2 3 2).

Практически для полной характеристики чередования катушечных групп всей обмотки достаточно записать (2 3 2 3 2) и т. д.

На рис. 14 приведена схема соединений обмотки с $q=1^1/_2$, в которой группы из двух и одной катушек чередуются между собой (см. вклейку между стр. 32 и 33)

Распределение больших и малых катушечных групп внутри периода чередования может быть совершенно произвольным. Любое из приведенных выше в нашем примере распределений обеспечивает правильное выполнение схемы обмотки. Практически принято распределять большие и малые катушечные группы внутри периода чередования по возможности равномерно.

Исходя из этого положения, рекомендуем наиболее простой, проверенный практикой способ определения чередований для двухслойных петлевых обмоток с числом q любой дробности. Так, например, требуется составить чередование катушечных групп по окружности статора при $q=2^3/_{10}$. По виду дроби определяем, что чередование будет состоять из семи двухкатушечных и трех трехкатушечных групп. Выписываем строчку из семи двоек:

$$22_{\uparrow}\ 22_{\uparrow}\ 22_{\uparrow}\ 2.$$

Стараясь по возможности равномерно распределить большие и малые катушечные группы, в промежутки, указанные стрелками, вставляем тройки; получаем законченное чередование:

(2 2 3 2 2 3 2 2 3 2).

Если $q=2^7/_{10}$, то трехкатушечных групп будет больше, чем двухкатушечных. Поэтому первую строчку составляем из семи троек, а между ними расставляем двойки.

Необходимость проверки приемлемости выбранного распределения катушечных групп внутри периода чередования может возникнуть лишь в том случае, если в составляемой схеме необходимо выполнить параллельные ветви.

Число возможных параллельных ветвей в двухслойных петлевых обмотках с дробным q определяется из соотношения

$$\frac{2p}{ad} = \text{целому числу.}$$

Все сказанное выше о трехфазных обмотках с дробным числом пазов на полюс и фазу справедливо для всех значений q, кроме тех, когда знаменатель дробности d равен или кратен 3. В этом последнем случае получается так называемая несимметричная трехфазная обмотка, где фазные напряжения не одинаковы по величине и сдвинуты относительно друг друга на угол не точно равный 120 или 240°.

3. РАСЧЕТЫ ОБМОТОК

Электродвигатели, поступающие в ремонт, как правило, имеют заводской паспортный щиток (паспортную табличку) и обмотку, сохранившуюся в такой степени, что возможно безошибочно определить обмоточные данные электродвигателя.

В этом случае, если при ремонте не требуется изменить параметры электродвигателя (напряжение и частоту вращения), имеются требуемые провода и электроизоляционные материалы, и кроме того обмоточные данные электродвигателя совпадают с содержащимися в опубликованных альбомах [Л. 9], которыми обычно располагают электроремонтные цехи, нет надобности производить какие-либо расчеты; при ремонте полностью повторяется заводское исполнение обмотки.

Если не сохранился заводской паспортный щиток и даже отсутствует обмотка электродвигателя, следует измерить внешний и внутренний диаметры и длину сердечника статора и ротора, определить форму, размеры и число пазов в сердечниках и попытаться найти в альбоме обмоточных данных тип электродвигателя, соответствующие данные которого полностью совпадали бы с замеренными. Если таким способом будет точно установлен тип электродвигателя, то также нет надобности производить расчет обмотки; ее следует выполнить по данным, относящимся к выявленному типу электродвигателя.

В тех же случаях, если электродвигатель очень старого выпуска и его нет в альбоме обмоточных данных или

он изготовлен иностранной фирмой, то расчет обмотки необходим, даже если в нем частично или полностью сохранилась обмотка. Это объясняется тем, что электродвигатель мог ранее ремонтироваться с отступлениями от заводского исполнения, причем эти отступления могли быть недопустимыми и даже послужить причиной выхода электродвигателя из строя. Расчетным путем (поверочным расчетом) устанавливается, соответствует ли обмотка паспортным данным электродвигателя и находятся ли в норме его электромагнитные нагрузки.

Расчет обмотки также необходим:

при изменении параметров электродвигателя — для определения обмоточных данных, обеспечивающих новые измененные параметры;

при изменении заполнения паза из-за отсутствия электроизоляционных материалов и провода требуемых размеров и марок, а также при необходимости изменения числа витков, заложенных в паз. Расчетом оценивается влияние указанных изменений на мощность электродвигателя;

при изменении материала провода (замене медного провода на алюминиевый). Расчетом оценивается влияние указанной замены на мощность электродвигателя.

Для электродвигателей, которых нет в альбоме обмоточных данных при отсутствии заводского паспортного щитка и полностью демонтированной обмотке необходим так называемый восстановительный расчет для определения параметров электродвигателя и установления обмоточных данных. Этот вид расчета, являющийся наиболее сложным, может дать только приближенное решение, которое должно уточняться по результатам испытания отремонтированного электродвигателя.

ПОВЕРОЧНЫЙ РАСЧЕТ

Длительным опытом проектирования и изготовления асинхронных двигателей установлены допустимые электромагнитные нагрузки для обмоток и активной стали и степень (коэффициент) заполнения паза обмоточным проводом.

Целью проверочного расчета является вычисление указанных величин и сравнение их с допустимыми значениями. Если в результате расчета будет установлено, что электромагнитные нагрузки и коэффициент заполне-

ния паза находятся в допустимых пределах, то можно считать, что обмоточные данные электродвигателя соответствуют его паспортному щитку.

На основании паспортных и обмоточных данных, а также снятых с натуры размеров электродвигателя определяют следующие необходимые для расчета величины:

1. Число полюсов электродвигателя

$$2p = \frac{120f}{n}, \qquad (1)$$

где f — частота тока в питающей сети, Гц; n_c — синхронная частота (скорость) вращения электродвигателя (частота вращения магнитного поля статора).

Для принятой в СССР для промышленных целей частоты тока 50 Гц

$$2p = \frac{6000}{n_c}. \qquad (2)$$

На паспортном щитке электродвигателя указывается не синхронная частота вращения, а действительная n, отличающаяся от синхронной на величину скольжения.

Скольжение при номинальной мощности электродвигателя выражается в процентах по отношению к синхронной скорости

$$s = \frac{n_c - n}{n_c} 100 \qquad (3)$$

и составляет в зависимости от мощности электродвигателя 1,5—5%.

Таким образом, для определения числа полюсов следует частное от деления 6000 на число, указывающее частоту вращения, уменьшить на 1,5—5% до ближайшего целого четного числа.

2. Полюсное деление (см)

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}, \qquad (4)$$

где D — внутренний диаметр статора (диаметр расточки), см.

3. Зубцовый шаг (см)

$$t = \frac{\pi D}{Z}, \qquad (5)$$

где Z — число пазов статора.

4. Активная длина сердечника статора (см)

$$l = k_c (l_1 - n_к b_к), \qquad (6)$$

где l_1 — полная длина сердечника стали (включая радиальные вентиляционные каналы), см; $n_к$ — число вентиляционных каналов; $b_к$ — ширина вентиляционного канала, см; k_c — коэффициент заполнения сердечника сталью, зависящий от толщины листов, вида межлистовой изоляции, а также учитывающий неплотное прилегание листов друг к другу.

Для листов толщиной 0,5 мм значение коэффициента k_c составляет:

При изолировке бумагой	0,90
При лаковой изоляции	0,93
При оксидной изоляции или при отсутствии изоляции между листами	0,95

5. Площадь паза $Q_п$ (см²).

Наиболее распространенные формы пазов приведены на рис. 15.

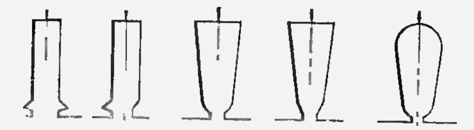


Рис. 15. Наиболее распространенные формы пазов.

6. Расчетная ширина зубца (см):

$$b = {}^2/_3 b' + {}^1/_3 b'', \qquad (7)$$

где b' — ширина зубца в самом узком месте, см; b'' — ширина зубца в самом широком месте, см.

7. Высота спинки (см)

$$h_c = \frac{D_1 - D}{2} - h_п, \qquad (8)$$

где D_1 — наружный диаметр сердечника стали, см; $h_п$ — высота паза, см.

Как указывалось, задачей поверочного расчета является определение электромагнитных нагрузок и сравнение их с допустимыми.

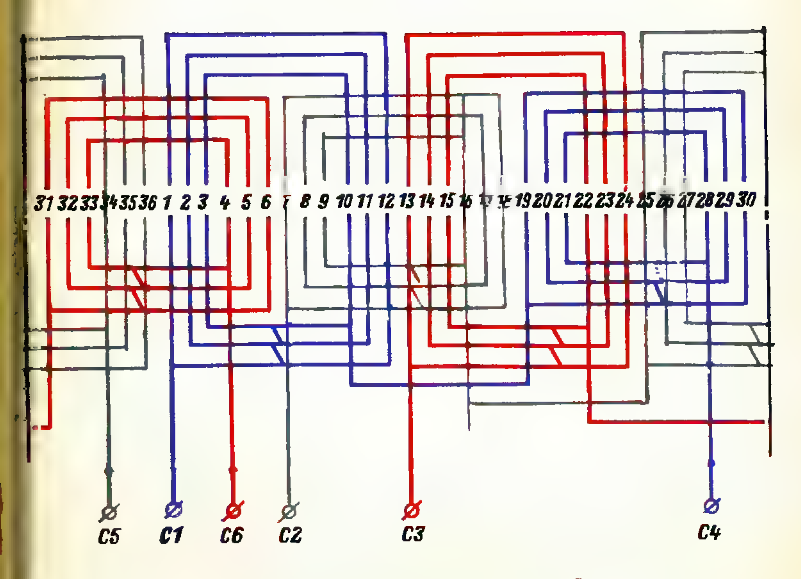


Рис. 2. Схема однослойной концентрической обмотки.
$2p=4$; $Z=36$.

Рис. 4. Схема двухплоскостной концентрической обмотки.
$2p=8$; $Z=48$; $a=2$.

Рис. 5. Схема обмотки с переходной катушечной группой.
$2p=6$; $Z=36$.

C5 C1 C6 C2 C3 C4

Рис. 6. Схема двухплоскостной концентрической равнокатушечной обмотки.
$2p=4$; $Z=36$.

C1 C6 C2 C4 C3 C5

Рис. 7. Схема трехплоскостной концентрической обмотки «вразвалку».
$2p=2$; $Z=36$; $a=1$.

Рис. 8. Схема простой шаблонной обмотки.
$2p=2$; $Z=18$; $y=9$.

Рис. 9. Схема шаблонной обмотки «вразвалку».
$2p=2$; $Z=24$; $q=4$; $y=11$ и 9.

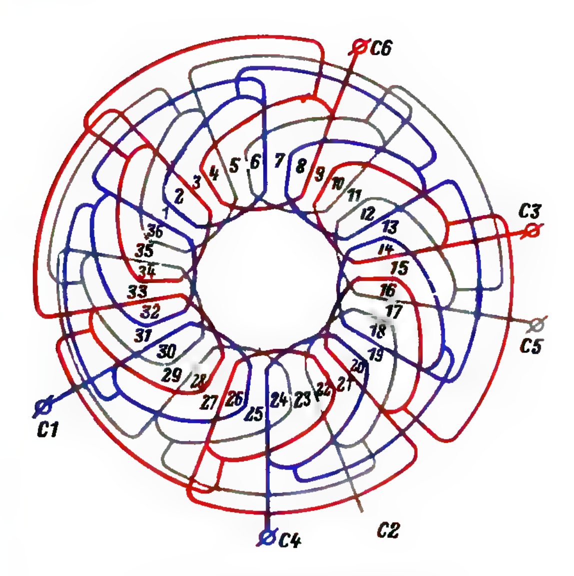


Рис. 10. Схема цепной обмотки.
$2p=6$; $Z=36$; $q=2$; $y=5$.

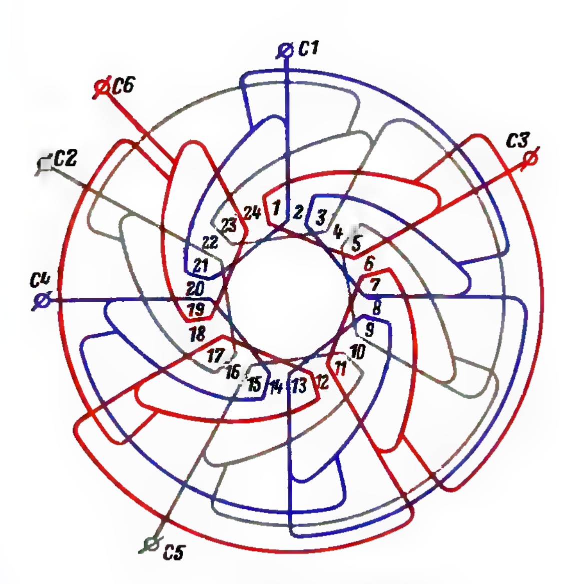


Рис. 11. Схема цепной обмоткн.
$2p=4$; $Z=24$; $q=2$; $y=5$.

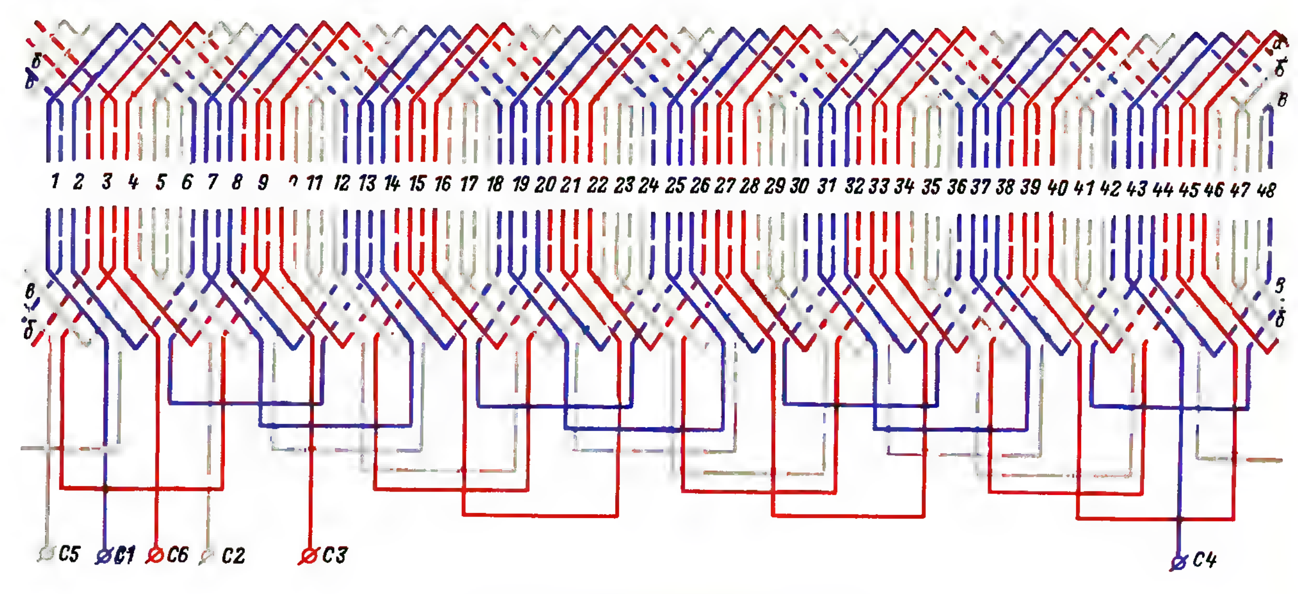


Рис. 12. Схема двухслойной обмотки.
$2p=8$; $Z=48$; $y=5$; $a=1$.

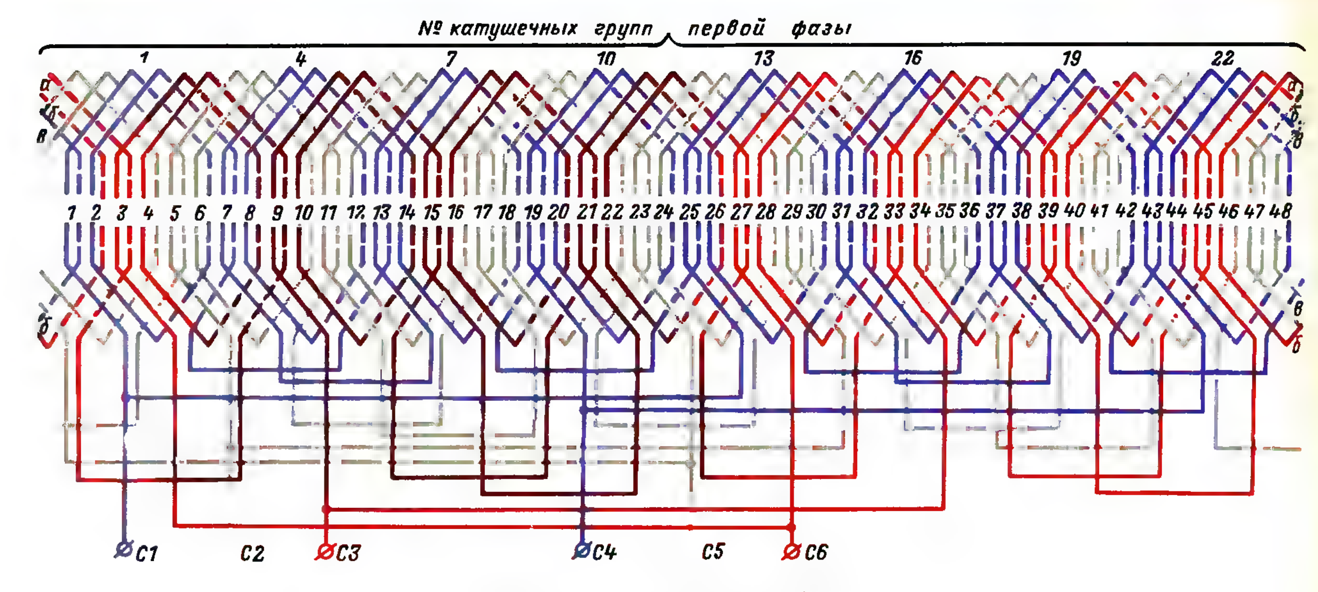


Рис. 13. Схема двухслойной обмотки.
$2p=8$; $Z=48$; $y=5$; $a=2$.

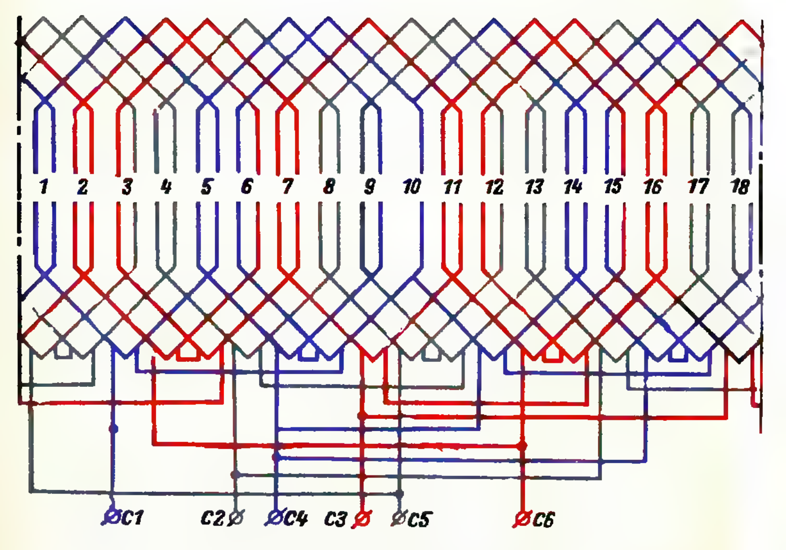


Рис. 14. Схема двухслойной обмотки.
$2p=4$; $Z=18$; $q=1\frac{1}{2}$.

Для статора характерными величинами являются:

B_δ — индукция в воздушном зазоре, Т;

$B_с$ — индукция в спинке, Т;

$B_з$ — индукция в зубцах, Т;

j — плотность тока, А/мм²;

A — линейная нагрузка, А/см;

$k_п$ — коэффициент заполнения паза.

Допустимые значения указанных величин в зависимости от мощности электродвигателя приведены в табл. 2.

Таблица 2

Наименование	Обозначение	Единица измерения	Мощность, кВт			
			Свыше 100	10—100	1—10	До 1
Индукция в воздушном зазоре	B_δ	Т	1,0—0,9	0,9—0,7	0,7—0,6	0,6—0,3
Индукция в спинке	$B_с$	Т	1,7—1,4	1,6—1,3	1,6—1,2	1,5—1,1
Индукция в зубцах	$B_з$	Т	2,0—1,8	1,8—1,4	1,6—1,4	1,5—1,3
Плотность тока в обмотке	j	А/мм²	5—3	5,5—4	6—5	8—6
Линейная нагрузка	A	А/см	350—600	250—400	200—300	150—200
Произведение плотности тока на линейную нагрузку	jA	$\frac{А^2}{мм^2 \cdot см}$	2000		1700	
Коэффициент заполнения паза при однослойной обмотке	$k_п$	—	0,45	0,43	0,40	0,37
Коэффициент заполнения паза при двухслойной обмотке	$k_п$	—	0,42	0,40	0,37	0,35

Примечание. В электродвигателях с алюминиевой обмоткой электромагнитные нагрузки на 10—15% меньше, а коэффициент заполнения паза на 8—10% больше, чем в электродвигателях с медной обмоткой.

Если в результате поверочного расчета будет установлено, что электромагнитные нагрузки находятся в допустимых пределах, можно при ремонте полностью копировать старую обмотку.

Большое расхождение вычисленных нагрузок с допустимыми может быть результатом ошибок, допущенных при предыдущем ремонте электродвигателя. Кроме того, не исключена возможность, что паспорт и обмоточ-

ные данные не соответствуют друг другу из-за того, что предыдущий ремонт электродвигателя производился с изменением номинальных параметров, но это не было отражено на заводском паспортном щитке.

Расчетные формулы

1. Индукция в воздушном зазоре (Т)

$$B_\delta = \frac{2{,}5 p U_\phi a}{l_1 Z D w_{э.п} k_о} 10^2, \qquad (9)$$

где $U_ф$ — фазное напряжение, В;

$U_ф = U$ — при соединении фаз в треугольник; (10)

$U_ф = U/\sqrt{3}$ — при соединении фаз в звезду (11)

U — линейное напряжение, подводимое для питания электродвигателя);

$w_{э.п}$ — число эффективных проводов в пазу:

$$w_{э.п} = \frac{6 w_{э.ф} a}{Z}, \qquad (12)$$

где $w_{э.ф}$ — число эффективных (последовательно соединенных) витков в фазе; a — число параллельных ветвей в фазе; $k_о$ — обмоточный коэффициент, величина которого зависит от числа пазов, приходящихся на полюс и фазу q, от шага обмотки y (табл. 3).

Таблица 3

Число катушек в катушечной группе	Сокращение шага обмотки в долях единицы										
	1,00	0,95	0,90	0,85	0,80	0,75	0,70	0,65	0,60	0,55	0,5
	Обмоточный коэффициент										
1	1,000	0,997	0,988	0,972	0,951	0,924	0,8[illegible]1	0,853	0,809	0,760	0,700
2	0,966	0,963	0,954	0,939	0,919	0,8[illegible]3	0,861	0,824	0,781	0,734	0,676
3	0,960	0,957	0,948	0,933	0,913	0,887	0,855	0,819	0,779	0,730	0,672
4	0,958	0,955	0,947	0,931	0,911	0,885	0,854	0,817	0,775	0,728	0,671
5—7	0,957	0,954	0,946	0,930	0,910	0,884	0,853	0,816	0,774	0,727	0,670
8	0,956	0,953	0,945	0,929	0,909	0,883	0,852	0,815	0,773	0,727	0,669
9 и более	0,955	0,952	0,944	0,928	0,908	0,882	0,851	0,815	0,773	0,726	0,668

Примечание. Для промежуточных значений сокращения шага обмоточный коэффициент определяется интерполяцией.

2. Индукция в зубцах (Т)

$$B_з = B_\delta \frac{t}{b} \frac{l_1}{l}. \qquad (13)$$

3. Индукция в спинке (Т)

$$B_с = 0{,}55 B_\delta \frac{D}{h_с} \frac{l_1}{l} \frac{1}{p}. \qquad (14)$$

4. Плотность тока (А/мм²)

$$j = \frac{I_ф}{Q_э a} = \frac{I_ф}{q_э m_1 a}, \qquad (15)$$

где $Q_э$ — сечение эффективного провода, мм²; $q_э$ — сечение элементарного проводника, мм²; m — число элементарных проводников в эффективном проводе; $I_ф$ — номинальный ток в фазе, А:

при соединении фаз в звезду

$$I_ф = \frac{P\,1000}{\sqrt{3}\,U\eta\cos\varphi}, \qquad (16)$$

при соединении фаз в треугольник

$$I_ф = \frac{P1000}{3U\eta\cos\varphi}, \qquad (17)$$

где P — номинальная мощность электродвигателя (мощность на валу), кВт;

η — коэффициент полезного действия; $\cos\varphi$ — коэффициент мощности.

5. Линейная нагрузка (А/см)

$$A = \frac{I_ф Z w_{э.п}}{\pi D a}. \qquad (18)$$

6. Произведение jA является одним из основных факторов, определяющих нагрев электродвигателя.

7. Коэффициент заполнения паза.

Переходя к определению коэффициента заполнения паза, следует отметить, что в технической литературе по этому вопросу нет единообразия. Некоторыми авторами коэффициент заполнения паза определяется как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, ко всей площади паза.

Другими авторами он определяется как отношение площади сечения всех неизолированных проводов, заложенных в паз, к площади паза. Коэффициент заполнения паза определяется так же, как отношение площади сечения всех изолированных проводов, заложенных в паз, к свободному сечению паза (т. е. к площади паза

за вычетом площадей, занимаемых клином, межслоевой прокладкой и пазовой изоляцией).

Нами принят первый способ, который менее точен, но более прост и практичен, т. е.

$$k_{п} = \frac{nq_{э.и}}{Q_{п}} = \frac{w_{э.п} m_1 q_{э.и}}{Q_{п}}, \qquad (19)$$

где n — общее число проводников, заложенных в паз; $q_{э.и}$ — сечение изолированного элементарного проводника.

Электродвигатели с короткозамкнутым ротором могут иметь ряд специфических ненормальностей из-за неправильного соотношения числа пазов статора, ротора и числа полюсов.

Ненормальности заключаются в том, что электродвигатель может «прилипать», т. е. не приходить во вращение при подключении к сети, или, начав вращаться, застревает на некоторой скорости, обычно составляющей $^1/_7$ номинальной, или при вращении сильно гудит.

Для избежания указанных явлений должны быть выдержаны следующие соотношения между числами пазов статора, ротора и полюсов:

$$\left.\begin{aligned}
&Z' \neq Z,\\
&Z' \neq 0{,}5Z,\\
&Z' \neq 2Z,\\
&Z' \neq 6pk,\\
&Z' \neq 6pk + 2p,\\
&Z' \neq Z \pm p,\\
&Z' \neq Z + 2p,\\
&Z' \neq 0{,}5Z + 2p,\\
&Z' \neq 2Z + 2p,\\
&Z' \neq 6pk \pm 1,\\
&Z' \neq 6pk \pm (2p \pm 1),
\end{aligned}\right\} \qquad (20)$$

где k — любое целое число от 1 до 4; Z' — число пазов ротора.

РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ НАПРЯЖЕНИЯ

При переводе электродвигателя на новое напряжение при той же частоте вращения условием сохранения его мощности является неизменность индукций на всех участках магнитной цепи и объема тока в пазу.

Из формулы (9) при неизменной индукции в зазоре следует:

$$\frac{U_{ф.с}a_с}{w_{э.\,п.с}k_{о.с}} = \frac{U_{ф.н}a_н}{w_{э.\,п.н}k_{о.н}}.^{*}$$

При сохранении типа и шага обмотки

$$w_{э.\,п.н} = w_{э.\,п.с}\frac{U_{ф.н}}{U_{ф.с}}.$$

Из формул (16) и (17) следует, что при сохранении плотности тока

$$\frac{I_{ф.н}}{I_{ф.с}} = \frac{U_{ф.с}}{U_{ф.н}} = \frac{Q_{э.н}}{Q_{э.с}}$$

или

$$Q_{э.н} = Q_{э.с}\frac{U_{ф.с}}{U_{ф.н}}.$$

Таким образом, при сохранении частоты вращения, плотности тока и мощности число эффективных проводов в пазу изменяется прямо пропорционально, а их сечение — обратно пропорционально новому и старому напряжению.

При увеличении числа проводов в пазу увеличивается объем, занимаемый изоляцией проводов. Поэтому по возможности приходится применять более толстые элементарные проводники, входящие в эффективный провод, или обмоточные провода с более тонкой изоляцией. Иногда приходится прибегать к уменьшению числа параллельных ветвей в фазе и тем самым увеличивать сечение провода в каждой из параллельных ветвей.

Однако упомянутые мероприятия по увеличению коэффициента заполнения паза не всегда можно осуществить, или эффект их может оказаться недостаточным. Кроме того, переход на более высокое напряжение может быть связан с утолщением пазовой изоляции. Поэтому не всегда удается сохранить общее сечение меди в пазу, что приводит к необходимости снижения мощности электродвигателя.

Переход электродвигателей на пониженное напряжение во многих случаях позволяет увеличить их мощность благодаря облегчению пазовой изоляции и уменьшению числа эффективных проводов в пазу.

---

* Здесь и далее к обозначениям, относящимся к старому исполнению, добавляется индекс «с», к новому исполнению — индекс «н».

РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ

При переводе на другую частоту вращения электродвигателей с короткозамкнутым ротором следует сверить по формулам (20) возможность такого перевода с точки зрения допустимого соотношения нового, измененного числа полюсов и числа пазов статора и ротора.

При уменьшении числа полюсов и при сохранении индукции в воздушном зазоре увеличивается индукция в спинке статора. При увеличении числа полюсов имеет место обратная зависимость. Индукции же в зубцах остаются неизменными.

Пересчет электродвигателя в связи с изменением числа полюсов следует начинать с определения индукции на всех участках магнитной цепи. В некоторых случаях может оказаться, что спинка статора недостаточно загружена магнитным потоком и индукция в них может быть повышена. Это может иметь место у электродвигателей старых выпусков, где активные материалы не всегда были предельно загружены.

В тех случаях, когда можно при измененном числе полюсов сохранить индукцию в зазоре и зубцах или когда возросшая индукция в спинке и зубцах не окажется чрезмерной (превышение не более чем на 10—15% значений, приведенных в табл. 2), следует при пересчете руководствоваться следующим.

Из формулы (9) вытекает, что при сохранении индукции в зазоре и номинального фазного напряжения

$$\frac{p_c a_c}{w_{э.\,п.с} k_{о.с}} = \frac{p_н a_н}{w_{э.\,п.н} k_{о.н}},$$

т. е. новое число эффективных проводов в пазу составит:

$$w_{э.\,п.н} = w_{э.\,п.с} \frac{k_{о.с} a_н p_н}{k_{о.н} a_с p_с} = w_{э.\,п.с} \frac{k_{о.с} a_н n_{с.с}}{k_{о.н} a_с n_{с.н}}.$$

При сохранении типа, шага обмотки и объема тока в пазу сечение эффективного провода составит:

$$Q_{э.\,п.н} = Q_{э.\,п.с} \frac{p_с}{p_н} = Q_{э.\,п.с} \frac{n_{с.н}}{n_{с.с}}.$$

Номинальная мощность электродвигателя

$$P_н = P_с \frac{p_с}{p_н} = p_с \frac{n_{с.н}}{n_{с.с}}.$$

Когда при увеличении частоты вращения приходится уменьшать индукцию в зазоре, чтобы ввести в норму индукцию в спинке статора, пропорционально увеличивается число эффективных проводов в пазу и уменьшаются сечение эффективного провода и номинальная мощ-

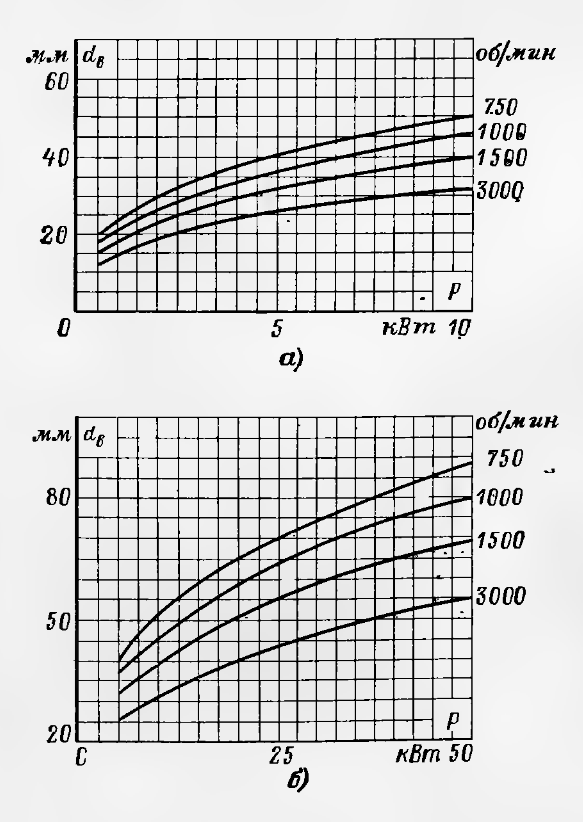


Рис. 16. Допустимая нагрузка на вал.
а — для электродвигателей до 10 кВт; *б* — для электродвигателей до 50 кВт.

ность электродвигателя. Увеличение числа эффективных проводов в пазу влечет за собой ухудшение коэффициента заполнения паза. Поэтому при перемотке электродвигателя следует применять провода с более тонкой изоляцией и максимально допустимого диаметра (из условия возможности укладки его через шлиц паза).

Для увеличения диаметра провода следует пересмотреть и по возможности уменьшить число элементарных проводников в эффективном проводе и число параллельных ветвей в фазе.

Указанное выше изменение мощности электродвигателя при изменении частоты вращения может рассматриваться как приближенное, так как при увеличении частоты вращения, с одной стороны, увеличиваются потери на трение, а с другой стороны, повышается производительность вентилятора.

Увеличение мощности электродвигателя при повышении частоты вращения может ограничиваться механической прочностью его частей и их нагревом.

При увеличении частоты вращения окружная скорость ротора не должна превышать: для фазного ротора 30—40 м/с; для короткозамкнутого ротора 40—60 м/с.

Бандаж фазного ротора при увеличении частоты вращения обычно нуждается в усилении.

Следует также по рис. 16 проверить прочность свободного конца вала (т. е. конца вала, служащего для насадки шкива, муфты или шестерни).

Нагрев подшипников также увеличивается при повышении частоты вращения и увеличении мощности электродвигателя, что отрицательно сказывается на общем коэффициенте полезного действия электродвигателя.

При перемотках, связанных с уменьшением числа полюсов, увеличиваются шаг обмотки и вылет лобовых частей. Следует проверить допустимость этого с точки зрения обеспечения требуемого изоляционного расстояния между торцевыми крышками и обмоткой.

РАСЧЕТ ПРИ ЗАМЕНЕ МЕДНЫХ ПРОВОДОВ АЛЮМИНИЕВЫМИ

При ремонте обмоток, связанном с заменой медных проводов алюминиевыми, основным фактором, влияющим на ход расчета, является различие в их удельном сопротивлении, составляющем при 20 °С: для меди $\rho_м = 0{,}017$ Ом·мм²/м; для алюминия $\rho_а = 0{,}028$ Ом·мм²/м.

Отношение удельных сопротивлений алюминия и меди

$$\frac{\rho_а}{\rho_м} = \frac{0{,}028}{0{,}017} = 1{,}65.$$

Если выполнить вместо медной обмотки алюминиевую проводом того же размера, оставив без изменения индукцию в воздушном зазоре и число эффективных проводов в пазу, то при номинальном токе возрастут потери в обмотке. Потери в стали останутся без изменения.

Для того чтобы сохранить потери в обмотке на прежнем уровне и тем сохранить суммарные потери электродвигателя, необходимо снизить фазный ток. Это снижение определится следующим образом.

Потери в фазе медной обмотки (Вт)

$$\Delta P_м = \frac{I^2_{ф.м}\rho_м l}{Q_{э.м}}\text{*}.$$

Потери в фазе алюминиевой обмотки (Вт)

$$\Delta P_а = \frac{I^2_{ф.а}\rho_а l}{Q_{э.а}},$$

где l — длина всех эффективных проводов в фазе.

Из условий равенства потерь и размеров провода вытекает:

$$I_{ф.а} = \frac{I_{ф.м}}{\sqrt{1,65}} = 0,78 I_{ф.м},$$

т. е. фазный ток должен быть снижен на 22%. Практически на столько же снижается и номинальная мощность электродвигателя.

Если же требуется сохранить номинальные ток и мощность электродвигателя, то для сохранения потерь в обмотке статора следует увеличить сечение эффективного провода. Это увеличение определяется следующим образом.

Так как

$$\frac{I^2_ф \rho_м l}{Q_{э.м}} = \frac{I^2 \rho_а l}{Q_{э.а}},$$

то

$$\frac{\rho_м}{Q_{э.м}} = \frac{\rho_а}{Q_{э.а}} = \frac{1,65\rho_м}{Q_{э.а}}$$

или

$$Q_{э.а} = 1,65 Q_{э.м}.$$

---

* Здесь и далее к обозначениям, относящимся к исполнению обмотки медным проводом, добавляется индекс «м», и к исполнению алюминиевым проводом — индекс «а».

При изготовлении обмотки из круглых проводов диаметр неизолированного алюминиевого провода должен быть увеличен по сравнению с медным:

$$d_{э.а}=\sqrt{1,65}d_{э.м}=1,28d_{э.м},$$

т. е. на 28%.

Так как укладка требуемого числа проводов при таком увеличении их диаметра невозможна, то при замене медных проводов алюминиевыми прибегают к следующим мерам.

1. Применяют обмоточные провода класса нагревостойкости Е марки ПЭВА-2 на поливинилацеталевом лаке или марки ПЭЛРА-2 на полиамиднорезольном лаке, имеющих более тонкую изоляцию, чем медные провода класса нагревостойкости А, марок ПБД и ПЭЛБО, которыми выполнялась обмотка в заводском исполнении.

2. Изоляцию паза выполняют тонкими электроизоляционными материалами класса нагревостойкости Е.

3. Увеличивают коэффициент заполнения паза, так как по сравнению с медными алюминиевые провода более эластичны.

4. Изменяют тип обмотки, применяют однослойную обмотку вместо двухслойной с целью исключения прокладки между катушками в пазу.

5. Изменяют схему обмотки, уменьшают число параллельных проводников в эффективном проводе или число параллельных ветвей в фазе, с целью применения элементарных проводников максимально допустимого диаметра 2,26 мм. (Для медных проводов максимально допустимый диаметр элементарного проводника составляет 1,86 мм.)

Для электродвигателей мощностью до 100 кВт со всыпной обмоткой подробные рекомендации по замене медных проводов алюминиевыми, направленные либо на сохранение номинальной мощности электродвигателя при одновременном переводе их изоляции на класс нагревостойкости Е, либо на незначительное снижение (на 10—15%) при сохранении класса изоляции А, разработаны инженером Н. М. Слонимом [Л. 10].

В этих рекомендациях учтена необходимость сохранения допустимых значений вращающих моментов, $\cos\varphi$ и η.

РАСЧЕТ ПРИ ИЗМЕНЕНИИ КОЭФФИЦИЕНТА ЗАПОЛНЕНИЯ ПАЗА

При ремонте электродвигателей старых выпусков представляется возможным увеличить коэффициент заполнения паза путем применения обмоточных проводов с более тонкой изоляцией. Естественно, что при увеличении сечения проводов, заложенных в паз, могут быть повышены ток и мощность электродвигателя. Однако это повышение не может быть пропорциональным увеличению коэффициента заполнения паза.

Следует учитывать, что для электродвигателя должны быть выдержаны отношение максимального вращающего момента к номинальному, что достигается увеличением индукции в воздушном зазоре (максимальный момент увеличивается пропорционально квадрату индукции в воздушном зазоре) путем уменьшения числа эффективных проводов в пазу.

Так как повышение индукции в воздушном зазоре связано с увеличением индукций на всех других участках магнитной цепи, то при этом увеличиваются потери в стали. С другой стороны, уменьшение числа проводов в пазу позволяет увеличить их сечение (помимо увеличения сечения за счет повышения коэффициента заполнения паза) и тем самым снизить потери в обмотке.

Н. М. Слоним [Л. 10] установил, что сохранение кратности максимального и номинального моментов, а также сохранение суммарных потерь при увеличении коэффициента заполнения паза достигается, когда каждому проценту увеличения коэффициента заполнения паза соответствует 0,7% увеличения мощности электродвигателя.

Если отношение коэффициентов заполнения паза в новом и старом исполнении составляет

$$b = \frac{k_{п.н}}{k_{п.с}},$$

то для увеличения мощности в указанном соотношении следует:

число эффективных проводов в пазу уменьшить в соотношении

$$\frac{w_{э.п.н}}{w_{э.п.с}} = \frac{1}{\sqrt{0,7b + 0,3}},$$

а сечение эффективного провода увеличить в соотношении

$$\frac{Q_{э.н}}{Q_{э.с}}=b\sqrt{0,7b+0,3}\,.$$

При этих изменениях плотность тока в обмотке уменьшится:

$$\frac{j_н}{j_с}=\frac{\sqrt{0,7b+0,3}}{b},$$

а линейная нагрузка и индукция в зазоре увеличатся

$$\frac{A_н}{A_с}=\frac{B_{\delta н}}{B_{\delta с}}=\sqrt{0,7b+0,3}.$$

Также уменьшится произведение плотности тока на линейную нагрузку:

$$\frac{j_нA_н}{j_сA_с}=\frac{0,7b+0,3}{b}.$$

Практически увеличение коэффициента заполнения паза может изменяться от 1,1 до 1,5. Для этих значений указанные выше соотношения сведены в табл. 4.

Таблица 4

Соотношение параметров	Значение соотношений параметров при коэффициентах b								
	1,1	1,15	1,20	1,25	1,30	1,35	1,40	1,45	1,5
$\frac{P_н}{P_с}$; $\frac{I_{ф.н}}{I_{ф.с}}$	1,07	1,105	1,14	1,175	1,21	1,245	1,28	1,315	1,35
$\frac{w_{э.п.н}}{w_{э.п.с}}$	0,97	0,955	0,94	0,925	0,91	0,90	0,88	0,87	0,86
$\frac{Q_{э.н}}{Q_{э.с}}$	1,14	1,21	1,28	1,36	1,43	1,50	1,58	1,66	1,74
$\frac{j_н}{j_с}$	0,94	0,915	0,890	0,875	0,850	0,825	0,805	0,790	0,775
$\frac{A_н}{A_с}$; $\frac{B_{\delta н}}{B_{\delta с}}$	1,035	1,05	1,07	1,085	1,10	1,115	1,13	1,145	1,16
$\frac{j_нA_н}{j_сA_с}$	0,97	0,96	0,95	0,94	0,93	0,922	0,915	0,909	0,905

Ввиду сохранения потерь на прежнем уровне при одновременном увеличении номинальной мощности электродвигателя его к. п. д. возрастает, а коэффициент мощности несколько уменьшится.

РАСЧЕТ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ

Как указывалось, в ремонт могут поступать электродвигатели, в которых отсутствуют паспортные щитки, а обмотки либо демонтированы, либо повреждены в такой степени, что не представляется возможным определить и при ремонте сохранить их параметры. Также может быть, что обмотка электродвигателя не заводского исполнения и нет уверенности в ее технической правильности.

В этих случаях следует проверить, нет ли в альбомах обмоточных данных [Л. 9] такого электродвигателя, геометрические и конструктивные размеры которого совпадают с данными ремонтируемого электродвигателя. При таком совпадении, когда ремонтируемому электродвигателю будет подобран его заводской паспорт, надобность в расчете отпадает; при ремонте полностью повторяется заводское исполнение обмотки.

Если же по альбому обмоточных данных не будет установлен паспорт электродвигателя, то требуемое напряжение и частота вращения оговариваются заказчиком в задании на ремонт, а обмоточные данные устанавливают расчетным путем на основании снятых с натуры размеров, руководствуясь данными по допустимым электромагнитным нагрузкам, приведенным в табл. 2.

Для рассматриваемого вида ремонта последовательность расчета следующая:

1. Вычисляют в соответствии с заданием и размерами электродвигателя:

число полюсов $2p$ — по формуле (1);
полюсное деление τ — по формуле (4);
зубцовый шаг статора t — по формуле (5);
активную длину пакета стали l — по формуле (6);
площадь паза $Q_п$ — по рис. 15;
расчетную ширину зубца статора b — по формуле (7);
высоту спинки $h_с$ — по формуле (8).

2. Определяют (ориентировочно) полезную мощность электродвигателя (кВт):

$$P = ADln_c,$$

где A — коэффициент использования (постоянная мощности), значение которого в зависимости от полюсного деления τ приведено на рис. 17.

Мощность электродвигателя, определенная по этой формуле, является приближенной. Вычисление ее производится только для возможности пользования при расчетах табл. 2, где допустимые электромагнитные нагрузки и коэффициент заполнения паза указаны в зависимости от мощности электродвигателя.

3. Руководствуясь табл. 2 и сообразуясь с ориентировочной мощностью электродвигателя, задаются индукцией в воздушном зазоре и вычисляют значение индукции в зубцах статора по формуле (13) и в спинке статора по фор- формуле (14).

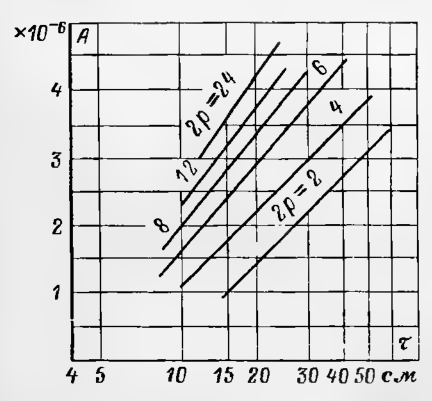


Рис. 17. Зависимость постоянной мощности A от полюсного деления τ.

Расчет начинают, задаваясь максимальным значением B_δ (в табл. 2 для каждой мощности указаны предельные максимальное и минимальное значения индукции). Целесообразность этого следует из формулы (9). Увеличение B_δ влечет за собой пропорциональное уменьшение числа эффективных проводов в пазу, что в свою очередь позволяет увеличить сечение каждого эффективного провода и тем самым повысить фазный ток и мощность электродвигателя.

Однако индукции в зубцах и спинке статора пропорциональны индукции в воздушном зазоре. Чрезмерное значение индукции в воздушном зазоре может привести к недопустимым индукциям в активной стали электродвигателя и, как следствие этого, к увеличению намагничивающего тока, возрастанию потерь и снижению коэффициентов мощности и полезного действия электродвигателя. При очень больших индукциях в спинке статора наблюдается вытеснение потока в окружающие конструктивные детали электродвигателя и сильный нагрев этих деталей. В таких случаях предварительно вы-

бранное максимальное значение индукции в зазоре должно быть снижено в такой степени, чтобы сопряженные с ней индукции на других участках магнитной цепи электродвигателя уложились бы в допустимые пределы.

Если при составлении вариантов расчетов индукций при различных значениях B_δ не удается добиться требуемых результатов, то это может быть по причине неправильного задания при заказе на ремонт, например частоты вращения электродвигателя.

Из сопоставления формул (9) и (14), принимая среднее из приведенных в табл. 2 значений индукции в спинке статора, можно получить следующую ориентировочную зависимость между числом полюсов, диаметром расточки и высотой спинки статора:

$$2p = (0{,}5 \div 0{,}6)\frac{D}{h_с}.$$

Поэтому при неудовлетворительных результатах подсчета индукции следует произвести повторные расчеты при другом числе полюсов, вычисленном по этой формуле. Если при допустимом значении индукции в зазоре получается завышенная индукция в спинке статора, следует увеличить число полюсов и тем самым разгрузить спинку. Если же индукция $B_с$ значительно меньше указанной в табл. 2, то следует уменьшить число полюсов.

4. Выбирают тип обмотки.

В асинхронных двигателях малой и средней мощности для статоров применяют однослойную обмотку с концентрическими катушками, а также двухслойную и однослойную цепную обмотки. В крупных электродвигателях применяют главным образом двухслойные обмотки, реже однослойные с концентрическими катушками.

Как указывалось, в электродвигателях мощностью 0,6—100 кВт серий А и АО применена однослойная обмотка для всех электродвигателей 3-го и 4-го габаритов и для четырех- и шестиполюсных электродвигателей 5-го габарита. В сериях А2 и АО2 применена однослойная обмотка для всех электродвигателей 1-го и 2-го габаритов и для электродвигателей 3-го и 4-го габаритов серии АО2. Для всех остальных серий А, АО, А2 и АО2 применена двухслойная обмотка.

При ремонте электродвигателей упомянутых серий целесообразно сохранить типы их обмоток. При выборе обмотки для электродвигателей старых типов, поступив-

ших в ремонт с демонтированной обмоткой, следует руководствоваться следующими соображениями.

В двухслойных обмотках масса обмоточных проводов на 10—15% меньше, чем в однослойных, что уменьшает электрическое сопротивление обмотки и тем самым повышает к. п. д. и $\cos\varphi$ электродвигателя. Обмотка может быть выполнена при q любой дробности, что также очень важно.

Достоинством однослойных обмоток является более высокий коэффициент заполнения паза медью из-за отсутствия прокладки между верхней и нижней сторонами катушек, заложенных в паз. А так как укорочение шага связано с увеличением числа эффективных проводов в пазу, то применение однослойных обмоток для мелких электродвигателей может обеспечить большую мощность, чем при двухслойной обмотке. Трудоемкость ее укладки в пазы несколько ниже, чем двухслойной.

После выбора типа обмотки статора вычисляют шаг обмотки:

при однослойной обмотке диаметральный

$$y=\frac{Z}{2p},$$

при двухслойной укороченный

$$y=k_у\frac{Z}{2p},$$

где $k_у$ — коэффициент укорочения, равный 0,8—0,85.

Определяют обмоточный коэффициент $k_о$ по табл. 3.

5. Определяют на основании формулы (9) число эффективных проводов в пазу:

$$w_{э.п}=\frac{2,5U_ф pa}{B_\delta ZDl_1k_о}10^2.$$

Разбивка обмотки фазы на параллельные ветви ($a>1$) и, как будет указано ниже, разбивка эффективного провода на элементарные провода ($m_1>1$) производится для того, чтобы провод мог проходить через шлиц паза.

В электродвигателях малой и средней мощности стремятся выполнить обмотку с $a=1$ и $m_1=1$, причем в электродвигателях малой мощности это условие обычно получается автоматически.

При определении числа параллельных ветвей в каждой фазе обмотки и числа элементарных проводников

в эффективном проводе, заложенном в паз, руководствуются следующим:

при заданном сечении эффективного провода следует стремиться применить один провод или несколько проводов максимально допустимого сечения. Как указывалось, максимальный диаметр провода (без изоляции) не должен превышать для обмоток из медного провода 1,81 мм и для обмоток из алюминиевого провода 2,26 мм;

диаметр изолированного провода должен быть на 0,5—0,7 мм меньше размера шлица паза. В противном случае может иметь место повреждение изоляции проводов при их укладке.

Число параллельных ветвей в фазе не может быть произвольным. Выполнимость обмотки с тем или иным числом параллельных ветвей описывалась в § 2.

Для практических целей при выборе числа параллельных ветвей для электродвигателей мощностью до 100 кВт можно пользоваться табл. 5.

Таблица 5

Вид обмотки	Рекомендуемое число параллельных ветвей при числе полюсов электродвигателя					
	2	4	6	8	10	12
Двухслойная	1	1, 2	1, 2, 3	1, 2, 4	1, 2, 5	1, 2, 3, 4, 6
Однослойная	1	1, 2	1, 3	1, 2, 4	1, 5	1, 2, 3, 6

6. Определяют на основании формулы (19) сечение элементарного изолированного проводника (мм²):

$$q_{э.и} = \frac{k_п Q_п}{n} = \frac{k_п Q_п}{m_1 w_{э.п}},$$

где n — общее число элементарных проводников в пазу.

Число элементарных проводников в эффективном проводе m_1 предопределено числом параллельных ветвей в фазе обмотки a; чем больше a, тем соответственно меньше m_1. Следует учитывать, что с уменьшением m_1 повышается коэффициент заполнения паза. Поэтому определение $q_{э.и}$ следует производить при трех-четырех вариантах m_1 и выбрать тот вариант, при котором диаметр изолированного элементарного проводника (мм), равный

$$d_{э.и} = 1,13 \sqrt{q_{э.и}},$$

будет ближе к максимально допустимому.

Диаметр неизолированного элементарного проводника (мм)

$$d_э = d_{э.и} - \Delta,$$

где Δ — двусторонняя толщина изоляции провода.

Ввиду большой номенклатуры применяемых обмоточных проводов часто бывает, что провод требуемых размеров отсутствует. В этих случаях прибегают к его замене двумя проводами, эквивалентными по суммарному сечению. Следует учитывать, что эта замена всегда влечет за собой увеличение коэффициента заполнения паза.

7. Вычисляют фазный ток статора (А) по формуле

$$I_ф = jam_1q_э,$$

где $q_э$ — сечение элементарного неизолированного проводника соответствующее величине $d_э$, приведенное в соответствующих каталогах или определяемое по формуле (мм²)

$$q_э = \frac{\pi d_э^2}{4},$$

j — плотность тока по табл. 2, А/мм².

8. Определяют величину A по формуле (18) и вычисляют произведение jA. Если это произведение превзойдет допустимые пределы, следует снизить $I_ф$ до такой степени, чтобы значения указанных произведений уложились в допустимые пределы.

9. Определяют кажущуюся мощность (кВ·А), потребляемую электродвигателем, по формулам (16) или (17):

при соединении фаз в звезду

$$P' = \frac{\sqrt{3}UI_ф}{1000},$$

при соединении фаз в треугольник

$$P' = \frac{3UI_ф}{1000}.$$

Номинальная мощность электродвигателя (мощност на валу), кВт

$$P = P'\eta \cos\varphi.$$

Значения η и $\cos\varphi$ подбирают по альбому обмоточных данных.

4. ТЕХНОЛОГИЯ РЕМОНТА ОБМОТОК

Большинство электродвигателей мощностью 0,6—100 кВт, поступающих в настоящее время в ремонт, относятся к сериям А, АО, А2 и АО2. Электродвигатели последней единой серии 4А пока поступают в ремонт в очень ограниченном количестве.

Следует ожидать, что благодаря надежности исполнения передача этих электродвигателей в ремонт по отношению к действующему парку будет значительно меньшей, чем электродвигателей предыдущих серий.

Электродвигатели старых типов, а также выпуска иностранных фирм поступают в ремонт в относительно малом количестве, и число таких электродвигателей из года в год убывает.

Для статоров асинхронных двигателей в указанном диапазоне мощности применяются так называемые *всыпные* обмотки из круглого изолированного провода. Обмотка состоит из катушек, наматываемых на станках на специальные шаблоны. Формы с точно установленными размерами они не имеют и укладываются (всыпаются) в полуоткрытые пазы сердечников через щели (шлицы) по одному проводнику.

Применяемые при ремонте электроизоляционные материалы и обмоточные провода подразделяются по классам нагревостойкости, но их выбор зависит также от исполнения электродвигателя.

Помимо нормального различают влагостойкое, тропикостойкое и химостойкое исполнение электродвигателей, заключающееся в сохранении стабильности электрических и физико-химических характеристик изоляции при воздействии соответственно:

водяных паров — 98% относительной влажности воздуха при 20 °С;

тропического климата, характеризуемого высокой и резко изменяющейся в течение суток температурой воздуха, его загрязненностью и влажностью, а также наличием плесневых грибков, насекомых и грызунов;

кислот, щелочей, их растворов и паров, растворителей (толуол, бензин, спирт, минеральное масло и др.) и окислителей (озон, хлор и др.).

В общей технологической цепи капитального ремонта электродвигателя описываемому ремонту всыпных обмоток статора предшествуют: приемка электродвигателя

в ремонт, предремонтные испытания, разборка и определение дефектов электродвигателя, демонтаж обмотки, очистка и мойка деталей электродвигателя, механический ремонт и при необходимости замена вышедших из строя деталей и узлов, ремонт ротора.

После ремонта обмотки статора производятся сборка, испытания и опробование электродвигателя на холостом ходу и под нагрузкой.

Ремонт обмоток статора подразделяется на операции: намотка катушек, заготовка изоляционных деталей, подготовка статора к укладке обмотки, укладка обмотки, пайка медных и алюминиевых проводов, изолировка соединений, сушка, пропитка и защитное покрытие обмоток, испытания обмотки.

Намотка катушек обмотки статора производится проводом с медной или алюминиевой токоведущей жилой, с эмалевой, волокнистой или комбинированной (эмальволокнистой) изоляцией.

По классам нагревостойкости провода изготовляются:

класса А — допускаемая температура 105 °С;
класса Е — допускаемая температура 120 °С;
класса В — допускаемая температура 130 °С;
класса F — допускаемая температура 155 °С;
класса Н — допускаемая температура 180 °С.

Для всыпных обмоток в зависимости от класса нагревостойкости изоляции и исполнения электродвигателя применяются провода круглого сечения, марки которых приведены в табл. 6.

Следует отметить, что провода с волокнистой и комбинированной изоляцией все больше вытесняются эма-

Таблица 6

Исполнение электродвигателя	Марка провода для изоляции класса				
	A	E	B	F	H
Нормальное	ПБД, ПЭЛШКО, ПЭЛБО, ПЭВ-2, ПЭВА-2, ПЭЛР-2, ПЭЛРА-2, ПЭЛШО	ПЭТВ, ПСД, ПСДТ, ПЭВТЛ-2	ПЭТВ, ПСД, ПСДТ	ПСД, ПСДТ, ПЭТ-155	ПСДК, ПСДКТ
Влагостойкое и тропическое	ПЭВ-2, ПЭВА-2, ПСД, ПЭЛШКО, ПСДТ	ПЭТВ, ПСД, ПСДТ	ПЭТВ, ПСД, ПСДТ	ПСД, ПСДТ, ПЭТ-155	ПСДК, ПСДКТ
Химостойкое	ПСД, ПСДТ	ПСД, ПСДТ	ПСД, ПСДТ	ПСД, ПСДТ	ПСДК, ПСДКТ

Примечание. Не рекомендуется применение проводов марки ПБД ввиду большой толщины изоляции и марки ПЭЛБО ввиду низкой электрической прочности изоляции.

лированными проводами, у которых толщина изоляции меньше в 1,5—2 раза, чем у проводов с комбинированной и в 2—3 раза меньше, чем у проводов с волокнистой изоляцией. Уменьшение толщины изоляции влечет за собой повышение ее теплопроводности и тем самым позволяет повысить плотность тока в обмотке. Кроме того, гладкая, скользкая поверхность эмалированных проводов облегчает их укладку и позволяет несколько повысить коэффициент заполнения паза.

К существенному недостатку эмалированных проводов относится термопластичность изоляции, ее размягчение при высокой температуре. При применении таких проводов для вращающихся обмоток необходима пропитка лаком, обладающим высокой цементирующей способностью, придающая обмотке необходимую монолитность.

В настоящее время продолжаются обширные изыскательские работы по упрочнению эмалевого покрытия проводов; осваиваются новые более надежные марки проводов и вместе с тем постепенно снимаются с производства провода с недостаточно прочной изоляцией, в том числе провода марки ПЭВТЛ-2.

Катушки желательно наматывать одним проводом; это обеспечивает компактность и правильную форму катушки. Катушки, намотанные из параллельных проводов, сложней укладывать в паз. У таких катушек повышается вероятность перекрещиваний проводов в пазу («крестов»), являющихся одной из причин обмоточного брака, из-за повреждения изоляции проводов при уплотнении катушки в процессе ее укладки в пазы.

Вместе с тем укладка в пазы медного провода диаметром больше 1,81 мм или алюминиевого провода диаметром больше 2,26 мм также затруднена из-за его жесткости, часто влечет за собой повреждение изоляции провода и разрыв вылетов пазовых коробок. Поэтому если согласно расчету диаметр провода превышает указанный, его разбивают на два параллельных проводника или более.

При отсутствии требуемого провода катушку наматывают проводом, отличающимся от него как размером, так и маркой изоляции. По той же причине разбивают провода на параллельные элементарные проводники, эквивалентные требуемому по своему суммарному сечению.

Все случаи замены проводов должны быть подтверждены соответствующим расчетом, так как это связано с изменением коэффициента заполнения паза.

Размеры катушек при перемотке обычно определяют по заводскому исполнению. У электродвигателей малой мощности катушки являются мягкими, податливыми, поэтому не так важно заснять их точную форму, которую можно несколько откорректировать в процессе укладки в пазы. как точно замерить длину витка.

Длину витка можно определить расчетным путем (мм):

$$l_{ср}=\frac{k\,(D+h_{п})\,y}{Z}+2l_1+60,$$

где $l_{ср}$ — средняя длина витка, мм; D — диаметр расточки статора, мм; $h_{п}$ — высота паза, мм; y — шаг обмотки по пазам; Z — число пазов статора; l_1 — длина стали статора, включая радиальные каналы, мм; k — коэффициент, определяемый по табл. 7.

Таблица 7

Число полюсов	Значение коэффициента k для обмотки	
	Двухслойной	Однослойной
2	8,2	9,2
4	8,5	9,5
6	9,1	10,2
8 и более	9,8	11,0

Целесообразно проверить размеры катушки на пробном образце. Заниженные размеры создают большую трудность или даже невозможность укладки обмотки в пазы. Завышение размеров катушки влечет за собой чрезмерно большой вылет лобовых частей, что недопустимо по условиям надежности отремонтированного электродвигателя; катушка должна отстоять от подшипниковых щитов не менее чем на 7—10 мм. После пропитки обмотки лаком подбойкой лобовых частей нельзя уменьшить их вылет или отгиб в радиальном направлении без того, чтобы не повредить изоляцию. Это особенно важно, если для пропитки обмотки применяется термореактивный лак, превращающий лобовые части в жесткий монолитный узел.

Намотку катушек производят на намоточном станке с помощью шаблона, соответствующего форме и размерам катушки.

Применяются металлические и деревянные шаблоны самых разнообразных конструкций. Однако в условиях ремонта наиболее целесообразными являются металлические (алюминиевые или силуминовые), так называемые универсальные шаблоны, рассчитанные на намотку катушек различного размера.

На рис. 18 представлен шаблон, разработанный для намотки катушек электродвигателей серии А и АО, но который может быть применен для обмотки статора любого электродвигателя мощностью 0,6—100 кВт.

Шаблон состоит из основания (рис. 18,*а*) и сменной головки (рис. 18,*б*), которую подбирают по табл. 8 в зависимости от размера витка.

Таблица 8

№ головки	Размеры, мм					№ головки	Размеры, мм				
	B	*R*	R_1	*H*	*h*		*B*	*R*	R_1	*H*	*h*
1	197	98,5	120	130	40	9	85	42,5	60	70	25
2	172	86	106	116	40	10	80	40	57	67	20
3	136	68	86	96	35	11	75	37,5	50	60	20
4	128	64	82	92	35	12	70	35	47	57	20
5	120	60	78	88	30	13	63	31,5	44	54	15
6	112	56	74	84	30	14	56	28	40	50	12
7	96	48	66	76	30	15	52	26	38	48	10
8	90	45	62	72	25						

На рис. 19 показан универсальный шаблон другого вида, в котором изменение размеров катушек, наматываемых на ролики *3*, достигается передвижением шпилек *2* по плите *1*.

В отличие от простейших шаблонов, рассчитанных на намотку только одной катушки, шаблоны, указанные на рис. 18 и 19, имеют несколько ручьев, позволяющих наматывать одним отрезком провода все катушки, входящие в катушечную группу или фазу, что уменьшает трудоемкость обмоточных работ и приводит к экономии припоя. Выполненная таким образом обмотка для электродвигателя малой мощности, как правило, не имеющая параллельных ветвей в фазе и параллельных проводников в витке, будет иметь только шесть выводов: начала и концы трех фаз.

По окончании намотки катушек очень много времени затрачивается на снятие их с шаблона. Указанный на рис. 20 шарнирный намоточный шаблон значительно ускоряет этот процесс.

При пользовании шаблоном конец обмоточного провода закрепляют на оправке *1*, наматывают последовательно всю катушечную группу, после чего отвинчивают

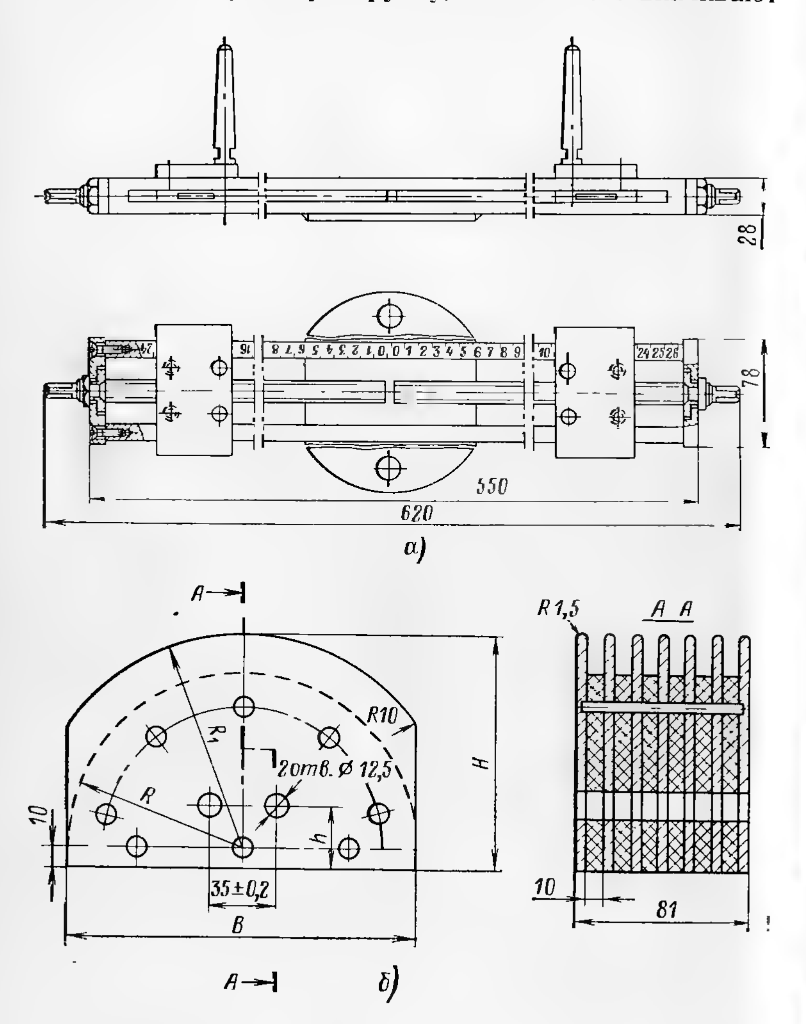


Рис. 18. Раздвижной шаблон.

а — основание шаблона; *б* — головка шаблона.

приблизительно на полоборота гайку *7*, снимают планку *6*, имеющую открытую прорезь, и поворачивают планки *3* и *5* вокруг своих осей. При этом головки *4* сходятся к центру и тем самым освобождают все намотанные катушки. Для намотки следующей катушечной группы оправку *1* прижимают обратно до упора планки *2*, насаживают планку *6* и затягивают гайку *7*.

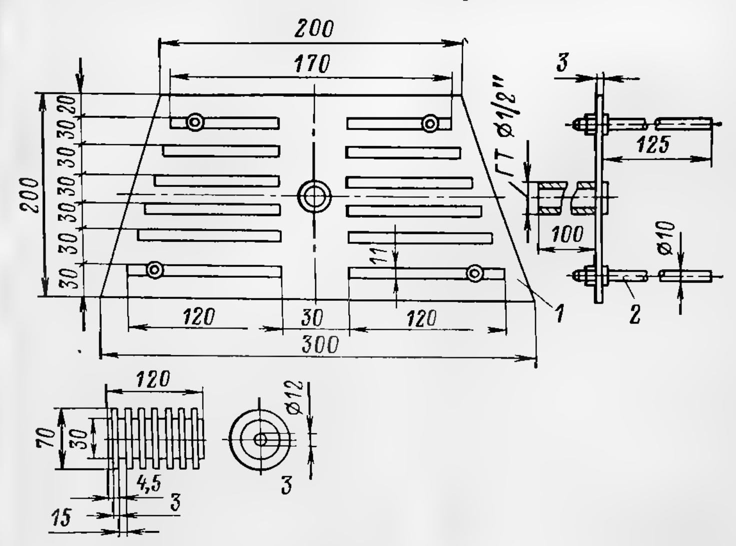


Рис. 19. Универсальный шаблон.

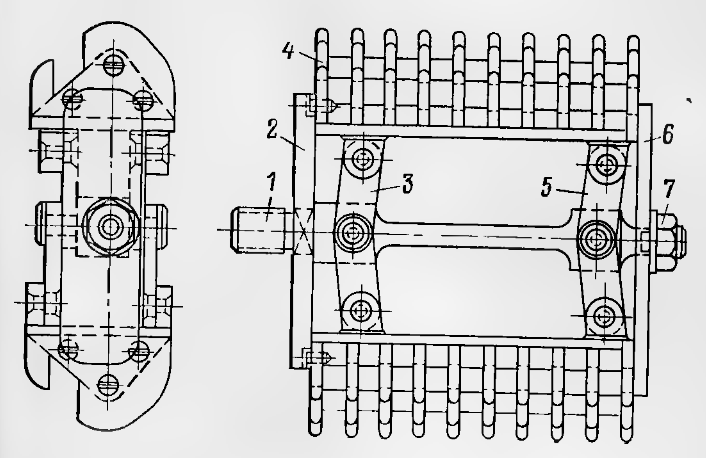


Рис. 20. Шарнирный намоточный шаблон.

В электродвигателях малой мощности распространены концентрические однослойные обмотки. Для намотки катушечной группы такой обмотки служит ступенчатый шаблон (рис. 21), число ступеней шаблона равно числу катушек в группе.

Намотку катушек производят на станках самой разнообразной конструкции, используя даже токарные станки, зажимая шаблон в патроне станка.

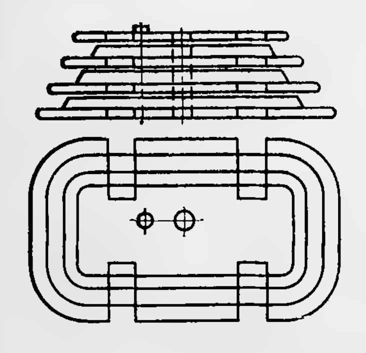


Рис. 21. Ступенчатый шаблон.

На рис. 22 изображен простейший намоточный станок с установленным на нем шаблоном с ручным приводом, изготовляемый обычно ремонтным подразделением своими силами. Изменение размеров наматываемых катушек производится передвижением головки шаблона *1* по его основанию *2*. Станок снабжен счетчиком оборотов *3*. Надобность в счетчике объясняется тем, что число витков в катушке может быть невелико и точность отсчета имеет большое значение.

Более совершенными являются намоточные станки заводского изготовления типа ТТ-20 и ТТ-22 с электрическим приводом.

Специализированные намоточные станки, применяемые на электромашиностроительных заводах и крупных электроремонтных подразделениях, имеют приспособления для автоматической остановки станка по окончанию намотки требуемого числа витков, а также для поддержания требуемого натяжения обмоточного провода.

Перед намоткой катушек подготавливают необходимое число барабанов или бухт обмоточного провода по количеству параллельных элементарных проводников витка, пропускают концы проводников через линоксиновую или полихлорвиниловую трубку для удобного поддерживания провода при намотке, а также через зажимное устройство, регулирующее натяжение провода, и закрепляют на шаблоне конец витка (или все его проводники, если виток подразделен на элементарные проводники).

Следует внимательно следить, чтобы сматывание провода с барабана или бухты производилось без образования петель (барашков), являющихся причиной обмоточного брака из-за повреждения изоляции рядом расположенных проводов при уплотнении катушки в процессе ее укладки в пазы.

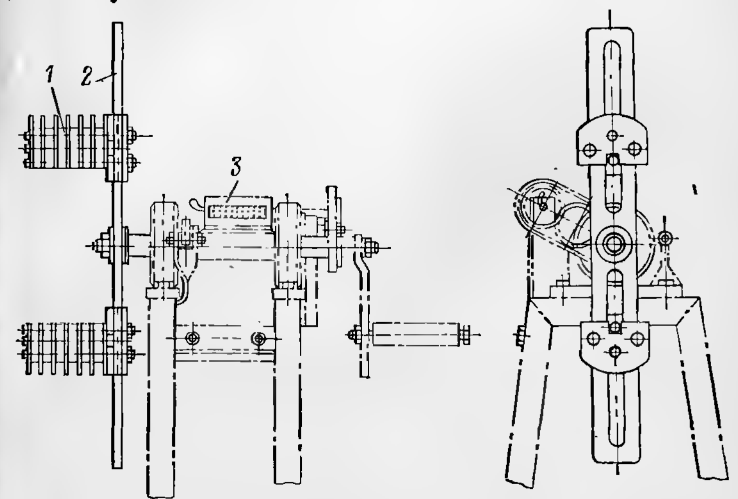


Рис. 22. Ручной станок для намотки катушек.

В шаблоне, состоящем из нескольких ручьев, наматывают первую катушку в первом ручье шаблона, затем переводят виток во второй ручей и наматывают в нем вторую катушку и так далее, пока не будет намотана вся катушечная группа. Каждую катушку в прямолинейной части перевязывают лентой или шпагатом, после чего снимают катушки с шаблона.

Намотку следует производить так, чтобы провода укладывались на шаблоне, параллельно друг другу, без перекрещиваний. При намотке катушек, витки которых состоят из нескольких элементарных проводников, следует следить, чтобы натяжение проводников было одинаковым — без затянутых или выступающих отдельных проводников, что обеспечит монолитность катушки.

При обрыве провода или его окончании на бухте место соединения с другим отрезком провода следует размещать только в лобовой части. После пайки или сварки соединение защищают электроизоляционной трубкой или обвертыванием стеклолентой.

Заготовка изоляционных деталей. Материалы, применяемые для изготовления пазовых коробок, междуфазовых прокладок, прокладок в пазу и других изоляционных деталей, подробно указывались в § 1 при описании заводского исполнения обмоток.

Чаще всего при ремонте повторяют заводское исполнение деталей. При отсутствии требуемых материалов и необходимости замены ни в коем случае нельзя снижать класс их нагревостойкости. Для повышения эксплуатационной надежности и увеличения срока службы электродвигателя целесообразно при ремонте повысить класс нагревостойкости материалов и, в частности, исключить материалы класса А, заменив их материалами класса В.

Также при ремонте нельзя завышать толщину изоляции, главным образом для пазовых коробок; это может привести к трудностям при укладке обмотки в пазы, повреждению изоляции обмоточных проводов и разрыву самих пазовых коробок.

Материалы, из которых изготовляются изоляционные детали, должны быть соответствующим образом подготовлены.

Электрокартон, пленкоэлектрокартон и лакоткань, поступающие обычно в больших тяжеловесных рулонах, перематывают в рулоны меньших размеров массой до 10—15 кг. Электрокартон просушивают в сушильной печи при 90—95 °С в течение 1—2 ч. В горячем виде электрокартон пропитывают в льняном масле или натуральной олифе и вновь сушат в печи при указанной температуре в течение 3—4 ч.

Допускается сушка пропитанного электрокартона также и на воздухе. В этом случае время сушки удлиняют до 24—36 ч. При сушке как в печи, так и на воздухе рулон электрокартона должен устанавливаться в вертикальном положении и быть распушен так, чтобы между отдельными витками был зазор 2—3 мм.

Следует также определить раскрой материала, обеспечивающий его минимальные отходы.

Резку заготовок для пазовых коробок и других деталей производят на рычажных ножницах, имеющих ограничительные и прижимные планки.

Резку электрокартона производят таким образом, чтобы направление волокон, уложенных в паз коробки, совпадало с продольной осью электродвигателя.

Лакоткань разрезают под углом 45°, а стеклолакоткань под углом 15° к оси полотна.

Для предохранения пазовых коробок, выступающих по торцам стали, от разрыва при укладке обмотки, концы коробок усиливают манжетами (отворотами), исполненными по одному из вариантов, указанных на рис. 23.

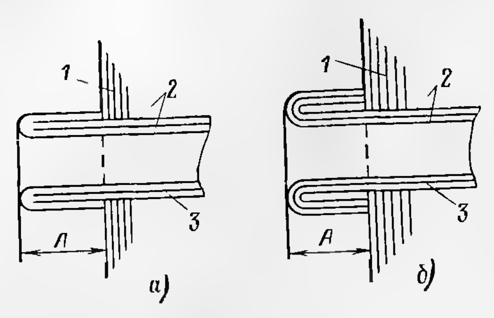


Рис. 23. Манжеты пазовых коробок.

а — манжета, образованная внутренним слоем пазовой коробки; *б* — манжета, образованная тремя слоями пазовой коробки; *1* — сердечник активной стали; *2* — электрокартон; *3* — внутренний слой лакоткани или миканита.

Трехслойная манжета (рис. 23,*б*) является более надежной, применение ее особо желательно в тех статорах, где нет опорных изоляционных колец на торцах сердечника активной стали, или где нельзя изолировать нажимные шайбы статора таким образом, чтобы их изоляция являлась опорой для концов пазовых коробок. Однако трехслойная манжета занимает больше места, чем выполненная по рис. 23,*а*.

При определении длины заготовок для коробок следует учитывать, что коробка должна выступать из пазов на длину, указанную в табл. 9.

Таблица 9

Мощность двигателя, кВт	Размер *А*, мм	
	Рис. 23, *а*	Рис. 23, *б*
До 5	10	8
Свыше 5 до 40	15	12
Свыше 40 до 100	20	15

При изготовлении пазовых коробок скомплектованные слои заготовок обжимают в опрессовочном приспо-

соблении, чтобы придать им нужную форму, и отдельные слои заготовок склеивают между собой.

Кроме пазовых коробок к началу ремонта должны быть подготовлены прокладки под клин, прокладки для установки в середине паза между сторонами катушек, междуфазовые прокладки, электроизоляционные трубки для изолировки мест соединения проводов, междукатушечных, междугрупповых и выводных соединений, а также пазовые клинья.

Прокладки, укладываемые в паз, должны быть шире паза, чтобы можно было выполнить их со скосами по краям. Размер междуфазовых прокладок в лобовых частях определяется по ширине шагом обмотки, а по длине вылетом лобовых частей.

Следует отметить, что в достаточно оснащенных электроремонтных цехах заготовка и формовка пазовых коробок механизирована, производится на специальных станках, например типа ПКС-940, а фигурные междуфазовые прокладки вырубаются прессом с помощью ножей, изогнутых по требуемой форме.

Пазовые клинья изготовляют из просушенной древесины твердых пород — бука, березы или из слоистых пластиков — текстолита или гетинакса. По своим механическим качествам, неподверженности усыханию и низкой гигроскопичности текстолит и гетинакс отвечают всем требованиям, предъявляемым к клиньям.

Высокая стоимость текстолита и гетинакса, а также трудность обработки ограничивают их применение. Тем не менее для клиньев толщиной 3—4 мм изготовление их из текстолита или гетинакса почти неизбежно, так как тонкие клинья из дерева недостаточно прочны.

Деревянные клинья изготовляют в основном из бука, березы или клена. Влажность древесины не должна превышать 10—12%. Для придания дереву повышенных электроизоляционных свойств и для замедления процесса поглощения влаги клинья пропитывают олифой или льняным маслом.

Для пропитки клинья погружают в бачок, заполняют его олифой или льняным маслом на 20—30 мм выше уровня заложенных деталей, нагревают бачок до 105—110 °С и при такой температуре пропитку проводят в течение 2—3 ч. Качество пропитки контролируется по виду излома пробной детали, и если при этом не все сечение клиньев пропитано маслом, время пропитки сле-

дует продлить. По окончании пропитки бачок охлаждают, не вынимая из него клиньев. По охлаждении клинья выгружают на металлическую или деревянную решетку и подсушивают в печи.

Так как при ремонте расходуется большое количество пазовых клиньев, то целесообразно механизировать их заготовку. На рис. 24 показана схема станка для изготовления деревянных клиньев. На вертикальном шпинделе станка установлена фасонная фреза *1* с пятью-восемью канавками, имеющими профиль клина. Доску *2* продвигают по плите станка и фрезеруют на ее поверхности клинья *4*. Эти клинья отрезаются по всей длине круглой пилой *3*, установленной на горизонтальном шпинделе станка. После отрезки клиньев доску *2* вновь подают под фрезу и продолжают процесс.

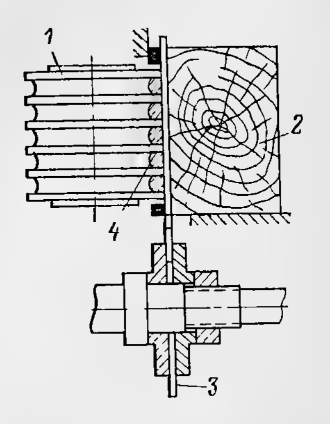


Рис. 24. Схема станка для изготовления деревянных клиньев.

Подготовка статора к укладке обмотки. Укладка новой обмотки статора может производиться только после проверки исправности сердечника активной стали. Устранение каких-либо даже мелких повреждений стали после укладки обмотки недопустимо, так как это может привести к нарушению изоляции катушек.

Статор, переданный для намотки, проверяют на отсутствие масляных пятен и загрязнений, которые могли остаться неудаленными после промывки статора в ванне. Эти загрязнения удаляют ветошью, смоченной в бензине.

В первую очередь определяют степень прессовки сердечника; активная сталь должна быть опрессована так плотно, чтобы сила трения между листами исключала возможность даже незначительного перемещения одного листа по отношению к другому. При хорошей прессовке сердечника лезвие перочинного ножа под сильным нажатием руки не должно заходить между листами больше чем на 1,5—2 мм. Недостаточная прессовка выявляется наличием ржавых пятен на поверхности расточки статора

из-за так называемой контактной коррозии, являющейся результатом перемещения и трения отдельных листов стали.

Чаще всего ослабление прессовки наблюдается в зубцовой зоне сердечника. Для ее восстановления иногда достаточно в месте с ослабленной прессовкой плотно забить текстолитовые или гетинаксовые клинья, размеры которых соответствуют зубцу (рис. 25). Клинья забивают на 2—3 мм ниже поверхности расточки и для предо-

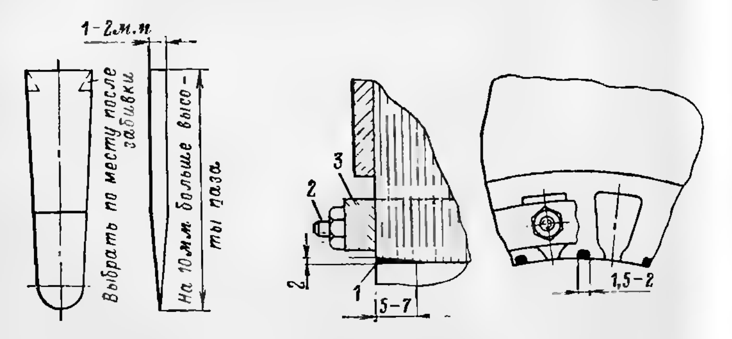


Рис. 25. Уплотняющий клин.

Рис. 26. Сварка крайних листов стали.

хранения от выпадения их обильно промазывают клеящим лаком или клеем БФ-2 и отгибают на них края смежных листов стали. После забивки уплотняющих клиньев сталь покрывают изоляционным лаком; при последующем ремонте и осмотре стали сохранность лаковой пленки поможет убедиться в отсутствии контактной коррозии в отремонтированном участке стали.

Если нажимные шайбы, прессующие сердечник, или торцевые утолщенные листы активной стали недостаточно жестки, то на торцах сердечника зубцы расходятся, образуя так называемый «веер». Исправление можно произвести пропиливанием в зубцах наклонных пазов и проваркой этих пазов тонким сварочным швом *1*, как это указано на рис. 26. При пропиливании и проварке зубцов сердечник сжимают в зубцовой зоне временными кольцами *3* при помощи стяжных болтов *2*, пропущенных через пазы. После проварки швы запиливают заодно с поверхностью расточки. Указанный способ устранения «веера» применим для электродвигателей малой мощности. Для более мощных и ответственных электродвигате-

лей этот способ ремонта стали не рекомендуется, так как в местах наложения сварочного шва может быть повышенный нагрев сердечника, неблагоприятно отражающийся на пазовой изоляции и изоляции обмоточных проводов. Для таких электродвигателей способ крепления активной стали должен быть модернизирован: установлены более массивные нажимные шайбы, дополнительные нажимные пальцы и др.

Повреждение обмотки статора, сопровождающееся возникновением электрической дуги, может вызвать оплавление участка активной стали. В этих случаях вырубают всю поврежденную зону так, чтобы не осталось сплавленных между собой листов, раздвигают листы отверткой или ножом и между ними на глубину 10—15 мм закладывают пластинки слюды 0,05—0,07 мм, после чего покрывают отремонтированный участок горячим лаком БТ-99.

Когда поврежденный участок стали находится в пазу, то вырубленную часть заполняют замазкой или прокладками из текстолита, гетинакса или миканита. Если зона повреждения значительна, иногда приходится обрубать целиком зубец на длину одного-двух пакетов. В этом случае вырубленный зубец заменяют заполнителем из текстолита или гетинакса. Заполнитель нужно тщательно подогнать по месту, чтобы он плотно лежал между обмоткой и сталью.

Следует отметить, что выплавление больших объемов стали и повреждение межлистовой изоляции могут потребовать полной перешихтовки активной стали с переизолировкой всех листов и равномерным распределением поврежденных листов по всему сердечнику.

Поверхностное замыкание листов стали, так называемые «затертые места», устраняют переносной шлифовальной машинкой с наждачным круглым или пальчиковым камнем, а при отсутствии шлифовальной машинки опиловкой или шабровкой поврежденных мест.

Во всех случаях порчи обмотки из-за чрезмерно высокой температуры сердечника, а также после ремонта, связанного с вырубкой большого объема активной стали, сердечник проверяют на отсутствие замыкания между листами стали и вследствие этого его повышенного нагрева.

Для проверки на статор наматывают несколько витков гибкого провода — намагничивающую обмотку и

пропускают через нее переменный ток. В сердечнике создается магнитный поток, и поврежденные места нагреваются. Проверку производят при индукции в спинке 1 Т, для создания которой число витков намагничивающей обмотки составляет:

$$w = (45 \div 50)\frac{U}{Q},$$

где U — напряжение сети, питающей намагничивающую обмотку, В; Q — сечение спинки сердечника, равное произведению активной длины сердечника, определение которой приведено в § 3, на высоту спинки, мм².

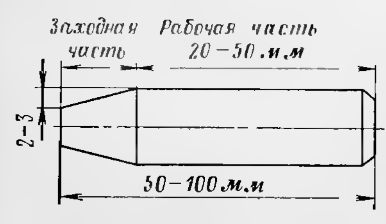


Рис. 27. Оправка для пазов.

При указанной индукции максимальный перегрев отдельных участков стали над температурой окружающего воздуха через 90 мин после начала испытания не должен превышать 45 °С, а разность между температурой отдельных участков стали не должна превышать 30 °С.

Пазы статора очищают от остатков старой изоляции и при необходимости опиливают напильником. Смещенные, выступающие в пазы зубцы выправляют стальной оправкой (рис. 27), размеры которой равны размерам паза в свету с допуском по ширине и высоте $^{+0,00}_{-0,10}$ мм, после чего продувают сердечник сжатым воздухом.

В тщательно проверенные и очищенные пазы устанавливают пазовые коробки, располагая их так, чтобы выступающие из пазов части коробок — вылеты были одинаковыми с обеих сторон сердечника, а сами коробки не были перекошены относительно шлица (щели) паза.

После укладки всех пазовых коробок пространство между нажимными шайбами, прессующими сердечник, и вылетами пазовых коробок заполняют прокладками в виде узких длинных полос электрокартона, электронита или миканита, согнутых в кольцо. Эти полосы должны быть на 3—4 мм шире толщины нажимной шайбы. Для предохранения от выпадания их скрепляют между собой и с сердечником.

Прокладки на нажимной шайбе служат опорой для вылетов коробок, являющихся слабым местом пазовой изоляции из-за неизбежных механических нагрузок, которым вылеты подвергаются при укладке катушек в пазы и отгибе лобовых частей.

Другим мероприятием, предотвращающим повреждение вылетов пазовых коробок, является опиливание (заваливание) острых граней зубцов на торцах сердечника, а также насадка фибровой или электронитовой гребенки на вылеты пазовых коробок.

В некоторых электродвигателях для упрочнения вылетов предусмотрено уширение пазов по краям сердечника, куда закладывают U-образные коробочки (манжеты) из электрокартона, фибры или другого гибкого и прочного электроизоляционного материала.

Укладка обмотки является одной из наиболее ответственных операций ремонта. Перед укладкой обмотчик должен получить и подробно ознакомиться с обмоточно-расчетной запиской ремонтируемого электродвигателя, в которой указывают:

паспортные данные электродвигателя;
число пазов статора;
марку и размеры обмоточного провода;
вид обмотки;
число витков в катушке;
число параллельных проводов в каждом витке;
шаг обмотки;
число параллельных ветвей в фазе;
число катушек в группе;
порядок чередования катушечных групп.

Каждый обмотчик помимо обычного измерительного и монтерского инструмента (плоскогубцы, круглогубцы, кусачки, стальной и деревянный молотки, мерные линейки и др.) должен иметь специальный инструмент (рис. 28), который во избежание порчи изоляции при укладке обмотки должен содержаться в полном порядке, не иметь зазубрин, заусенцев и других дефектов.

Рабочим местом обмотчика является поворотный стол, дающий возможность поворачивать статор вокруг вертикальной оси (рис. 29). Он состоит из верхнего поворотного диска *1* и нижнего неподвижного диска *6*, прикрепленного к верстаку *8* с помощью болтов *5*. В дисках проточена кольцевая канавка, в которую заложены шарики *4*, что дает возможность легко поворачивать диск *1*

вокруг оси вращения 7. Втулка 2 служит для подачи смазки в эту ось. Фиксация положения поворотного диска по отношению к неподвижному осуществляется защелкой 3, входящей в прорези, расположенные по периферии диска 1.

Для поворота статора вокруг его горизонтальной оси служит роликовая подставка, устанавливаемая на пово-

Рис. 28. Набор инструментов обмотчика.

1 — текстолитовая клиновидная пластина для отгиба лобовых частей; 2 — набор из 5—6 шт. подбоек для уплотнения проводов в пазу; 3 — стальная пластинка с закругленными гранями (считалка) для переборки витков; 4 — текстолитовая или гетинаксовая пластинка для проталкивания проводов через шлиц паза; 5 — нож для обрезки краев пазовых коробок, выступающих из шлицев пазов.

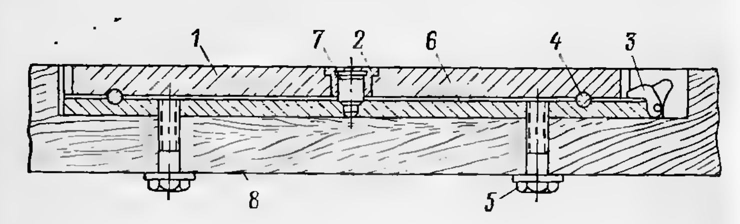


Рис. 29. Поворотный стол.

ротном столе. Поворотный стол и роликовая подставка дают возможность установить статор в любом удобном для обмотчика положении.

Укладку двухслойной обмотки начинают с проверки симметричности расположения пазовых коробок.

Катушку, подлежащую укладке, располагают над пазом, находящимся в самом низу расточки, и, пользуясь пластинкой *4* (рис. 28), проталкивают в паз все проводники нижней стороны катушки.

Во избежание перекрещивания проводников в пазу укладку производят в том же порядке, в котором эти проводники наматывались на шаблон. Необходимо внимательно следить, чтобы все проводники располагались параллельно друг другу. Указанным способом, поворачивая каждый раз корпус статора на одно пазовое деление, укладывают на дно паза все остальные нижние стороны катушек первой катушечной группы. Верхние стороны катушек этой группы остаются пока не уложенными. Затем в пазы закладывают междуслойные прокладки, а начало и конец катушечной группы надежно закрепляют лентой, шпагатом или «чулком» по наружному контуру головок лобовых частей крайних катушек. Выводные концы располагают параллельно проводам катушки.

Далее все катушки укладывают в пазы как нижними, так и верхними сторонами, причем после укладки нижних сторон катушек в пазы закладывают междуслойные прокладки, закрепляют начало и концы групп, а затем закладывают верхние стороны катушечных групп. Междуслойные прокладки, уложенные неправильно, с перекосом, не только не достигают своей цели — изолировать между собой стороны разных катушек, уложенных в один паз (катушки могут принадлежать разным фазам), но и могут явиться причиной брака при уплотнении обмотки.

Закладка верхних сторон катушек является более сложной операцией, чем закладка нижних сторон, так как часть паза уже заполнена проводами нижней катушки и междуслойной прокладкой.

Перед закладкой проводов верхних катушек производят уплотнение проводов в пазу. Для этого в паз вставляют уплотнитель *2* (рис. 28), продвигают его по междуслойной прокладке и одновременно с продвижением ударяют по нему молотком, тем самым осаживая обмотку ко дну паза. Перед укладкой проводов верхних кату-

шек их выравнивают и через шлиц закладывают в паз. В некоторых случаях после укладки только части проводов верхней катушки приходится повторно уплотнять паз.

После укладки всех витков вновь уплотняют провода, закладывают подклиновые прокладки и заклинивают пазы, не допуская заедания пазовых коробок забиваемыми клиньями, которыми можно легко повредить пазовые коробки.

В процессе укладки верхних сторон катушек и заклиновки пазов в лобовых частях между катушечными группами устанавливают прокладки под первые катушки каждой группы. Эти прокладки называются междуфазовыми и являются изоляцией между соседними катушками, принадлежащими к разным фазам.

Форма междуфазовых прокладок должна повторять форму лобовых частей обмотки с припуском в 5—7 мм по всему контуру. Эти прокладки должны перекрывать концы выступающих из пазов междуслойных прокладок.

Перед укладкой последних катушек необходимо не заложенные ранее в пазы верхние стороны катушек первого шага отогнуть к центру расточки, для того чтобы создать возможность укладки нижних сторон последних катушек.

Укладка верхних сторон шаговых катушек, которые подвергались перегибам в лобовых частях и провода которых могут быть перепутаны между собой, требует внимания и достаточных производственных навыков обмотчиков. В частности, до укладки проводники расправляют и придают им нужную форму, а саму укладку в пазы производят осторожно, следя за целостью изоляции, параллельностью и отсутствием перекрещивания проводников.

В процессе укладки обмотки производят отгиб (отбойку) лобовых частей в направлении от внутреннего к наружному диаметру сердечника статора. Этот отгиб, величина которого составляет 6—8°, должен обеспечивать свободный ввод ротора в расточку статора.

Чтобы не повредить вылеты пазовых коробок, отгиб лобовых частей должен начинаться не ближе 10—15 мм от торца пакета стали. Производится отгиб специальной пластиной, накладываемой всей своей поверхностью на лобовые части. Для проверки симметричности отгиба по окружности статора рекомендуется пользоваться шаблоном.

Так как при отгибе лобовых частей катушки плотно прижимаются друг к другу, и изоляция проводов может быть при этом нарушена, рекомендуется в местах соприкосновения катушек закладывать между ними дополнительную изоляцию из прокладок лакоткани.

Укладка однослойных обмоток проще, чем двухслойных; отпадает серьезная операция — подъем и последующая укладка одной стороны катушек первого шага, нет надобности в укладке междуслойных прокладок. Во всем остальном процесс укладки однослойных и двухслойных обмоток одинаков.

Пайка и изолировка соединений медных и алюминиевых проводов. При ремонте всыпных обмоток соединение проводов производят пайкой или сваркой.

При *пайке* соединяемые концы проводов очищают от окислов, жировых и других загрязнений, нагревают до определенной температуры (соединяемые концы проводов при этом остаются твердыми) и между ними вводят расплавленный припой — легкоплавкий металл или сплав, который смачивает соединяемые поверхности и после охлаждения и затвердения скрепляет их.

При *сварке* соединение проводов происходит за счет местного расплавления металла на концах проводов. Расплавление производится теплом от электрической дуги (электросварка) или при горении газов (газопламенная сварка).

Применяемые при пайке припои в зависимости от температуры плавления разделяются на мягкие и твердые.

Мягкими припоями, применяемыми при ремонте всыпных обмоток, являются оловянно-свинцовые марок ПОС40 и ПОС30, содержащие соответственно 39—41 и 29—31% олова. Температура начала плавления этих припоев 183°С, а конца плавления соответственно 235 и 255°С.

Увеличение содержания олова в припое повышает его жидкотекучесть. При соединениях, где паяльные зазоры представляют собой глубокие узкие щели применяют припой ПОС40, а в соединениях со сравнительно широкими щелями — припой ПОС30. Применение в данном случае более богатого оловом припоя неоправданно; в процессе пайки припой будет вытекать из щели.

Твердый припой, нашедший наибольшее применение при ремонте всыпных обмоток — меднофосфористый марки ПМФ7, являющийся сплавом меди и фосфора, содер-

жание которого в сплаве составляет 7—8,5%. Температура начала и конца плавления соответственно 710 и 800 °С.

При пайке медных проводов оловянно-свинцовым припоем применяют флюс — канифоль в виде порошка или 25%-ного раствора в спирте (флюс марки КСп). Назначение флюса — улучшение смачиваемости соединяемых поверхностей расплавленным припоем и защита от окисления в процессе пайки.

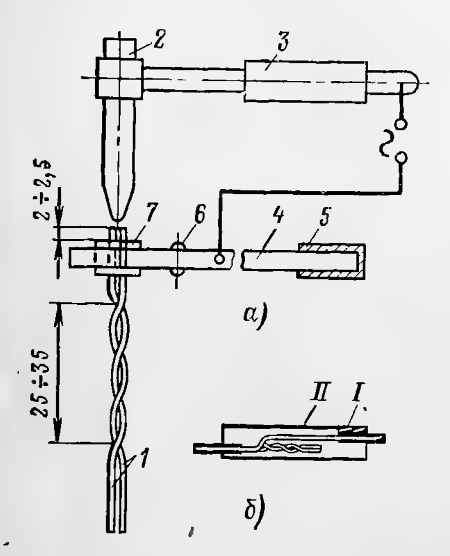


Рис. 30. Сварка и изолировка соединений проводов.

а — сварка соединения; *б* — изолировка соединения; *1* — свариваемые провода; *2* — угольный электрод; *3* — держатель электрода; *4* — ручные клещи; *5* — изолированные ручки клещей; *6* — ось клещей; *7* — сменные графитовые электроды клещей; *I* — изоляционная трубка, насаживаемая на провод; *II* — изоляционная трубка, насаживаемая на соединение.

Флюсом для медно-фосфористого припоя является обезвоженная бура; при недостаточном опыте пайщиков допускается пайка этим припоем без флюса.

Медные провода всыпных обмоток обычно соединяют сваркой (рис. 30). Для этого с концов проводов на длине 35—40 мм снимают изоляцию, зачищают концы и насаживают на них изоляционные трубки *I* по диаметру изолированного провода и на один из концов дополнительную трубку *II* большего диаметра. Затем скручивают между собой концы проводов четырьмя-пятью витками на участке 25—35 мм и сваривают торцы проводов угольным электродом. При сварке проводов диаметром до 1 мм диаметр электрода от 5 до 6,5 мм, при сварке проводов диаметром больше 1 мм диаметр электрода 10—12,5 мм. Напряжение при сварке проводов диамет-

ром до 1 мм должно быть 6—12 В, для сварки проводов большего диаметра 24—36 В.

После зачистки оплавленного места отгибают скрутку на один из проводов и надвигают изоляционную трубку II на скрутку. При отсутствии изоляционных трубок соединение изолируют двумя слоями стеклолакоткани и поверх нее одним слоем стеклоленты, подклеивая ее конец клеем или лаком.

Возникновение дуги при сварке и оплавление соединяемых проводов происходит за очень короткое время — доли секунды. Передержка дуги приводит к пережогу металла и связанной с этим хрупкости соединения, из-за чего при изгибе проводов они ломаются рядом с местом сварки. Поэтому очень часто наряду со сваркой применяют пайку проводов медно-фосфористым припоем марки ПМФ7 .

Для соединения медного провода с кабельным наконечником конец провода зачищают от изоляции, облуживают погружением в ванночку с расплавленным припоем марки ПОС30 и паяют с предварительно облуженным кабельным наконечником припоем ПОС40.

При пайке оловянно-свинцовыми припоями обычно пользуются паяльниками с электронагревом, в которых вокруг медного стержня (наконечника, которым производятся расплавление припоя и нагрев места соединения), изолированного жаростойким миканитом, наматывается нагревательный элемент — спираль из нихромовой или фехралевой проволоки. Для питания нагревательного элемента пользуются напряжением 10—36 В, которое более безопасно и позволяет применять для нагревателей провода большего диаметра, чем при напряжении 220 В.

Паяльники с электронагревом быстро выходят из строя из-за окисления и перегорания нагревательного элемента, кроме того, они неэкономичны, так как значительная часть тепла рассеивается. Более экономичными являются дуговые паяльники, где стержень (наконечник) нагревается электрической дугой, которая горит между ним и угольным электродом. Паяльник питается напряжением 35—40 В и потребляет ток 40—45 А.

При электросварке проводов и пайке дуговыми паяльниками следует пользоваться очками с защитными стеклами для предохранения глаз от действия электрической дуги.

Соединение алюминиевых проводов между собой или с медными значительно сложнее, чем соединение медных проводов из-за специфической особенности алюминия — быстрого образования на поверхности химически стойкой, тугоплавкой и малопроводящей пленки.

Для пайки применяют припои марок П250А, П300А и «Б», состав и температура плавления которых следующие:

припой марки П250А — олово 79—81%, цинк 19—21%; температура плавления 250 °С;

припой марки П300А — цинк 59—61%, кадмий 39—41%; температура плавления 310 °С;

припой марки «Б» — цинк 80%, алюминий 12%, медь 8%; температура плавления 410 °С.

Пайка указанными припоями производится с флюсом марки Ф59А, состав которого: кадмий борфторид 3%, аммоний борфторид 5%, триэтиноламин — остальное.

Применяют следующие способы соединения проводов:

Пайка способом погружения. Соединяемые концы облуживают, скручивают, офлюсовывают и опускают в ванну с расплавленным припоем. Применяется для внутрикатушечных соединений, а также для выводных соединений алюминиевых проводов с медным при диаметре алюминиевого провода до 2 мм.

Пайка способом заливки. Соединяемые концы облуживают, собирают встык в разборной асбоцементной форме и заливают расплавленным припоем. Этот способ применяется для внутрикатушечных соединений, а также для выводных соединений алюминиевых проводов с медным при диаметре алюминиевого провода более 2 мм.

Сварка способом контактного нагрева. Сваривание торцов соединяемых проводов производят за счет тепла, выделяющегося в месте контакта с токоведущими графитовыми губками ручных клещей и графитовым электродом. Применяется для соединения алюминиевых проводов диаметром до 2 мм.

Ниже приводится описание операций по выполнению указанных соединений.

Зачистка концов провода. С концов алюминиевых проводов удаляют эмалевую изоляцию на длине 60—70 мм, с концов медных проводов удаляют оплетку и резиновую изоляцию на длине 35—40 мм, оголенные жилы зачищают до блеска. Удаление эмали с проводов диаметром до 1 мм производят ножом, с проводом диаметром свыше

1 мм — металлическими щетками, вращающимися навстречу друг другу. Окончательную зачистку производят стеклянной шлифовальной шкуркой. Зачищенные концы тщательно протирают бязевым тампоном, смоченным ацетоном или бензином. Перерыв между зачисткой и лужением или сваркой не должен превышать 2—3 ч.

Лужение. Лужению подвергают все зачищенные концы проводов за исключением алюминиевых, соединяемых сваркой контактным нагревом. Концы алюминиевых проводов покрывают флюсом Ф59А, а концы медных проводов (выводов) — флюсом КСп. Флюс наносят тонким слоем окунанием в ванночку или мягкой кистью. Для полуды офлюсованные концы погружают в ванночку с расплавленным припоем П250А или П300А. Температура нагрева припоя П250А — 310—320 °С, припоя П300А — 370—380 °С. Время выдержки до выравнивания температуры и прекращения выделения паров и дыма ориентировочно составляет 3—10 с и уточняется опытным путем. Облуженные концы встряхивают для удаления излишков припоя. Остатки флюса Ф59А не позже чем через 1—1,5 ч удаляют промывкой в горячей (60—70 °С) проточной воде и очисткой волосяной щеткой в течение 1,5—2 мин с последующей промывкой в холодной проточной воде и протиркой насухо чистым бязевым тампоном. Остатки флюса КСп после лужения не удаляют. При перерыве между лужением и пайкой более одного дня подлежащие пайке поверхности проводов сразу после лужения консервируют нанесением на них флюса КСп и высушиванием полученной пленки на воздухе.

Пайка погружением. При выполнении внутрикатушечных соединений скручивают между собой концы алюминиевых проводов четырьмя-пятью витками на участке длиной 25—35 мм. Для выводных соединений алюминиевый провод обматывают вокруг медного с расстоянием (шагом) между витками в 2—3 мм на участке 25—35 мм. Скрутку покрывают тонким слоем флюса КСп окунанием в ванночку или мягкой кистью и затем погружают в ванночку с расплавленным припоем П250А или П300А. Температура нагрева припоя П250А 295—305 °С, припоя П300А 345—355 °С. Время выдержки до выравнивания температуры ориентировочно составляет 5—15 с и уточняется опытным путем. После выемки из ванночки дают припою отвердеть, протирают место соединения бязевым тампоном, смоченным спиртом, герметизируют его —

покрывают кистью глифталевым лаком ГФ-95 и изолируют соединение так же, как для медных проводов.

Пайка заливкой. Облуженные концы проводов выправляют, выравнивают по торцу и собирают встык в разборной асбоцементной форме (рис. 31). Стык соединяемых проводов должен находиться против литникового отверстия. Собранные полуформы плотно стягивают струбциной и надежно закрепляют. Заливают форму расплавленным припоем «Б», нагретым до температуры 700—750 °С, производя заливку непрерывной струей. После затвердения припоя снимают струбцину, разбивают асбоцементную форму, удаляют литник, зачищают соединение, герметизируют и изолируют его так же, как при пайке погружением.

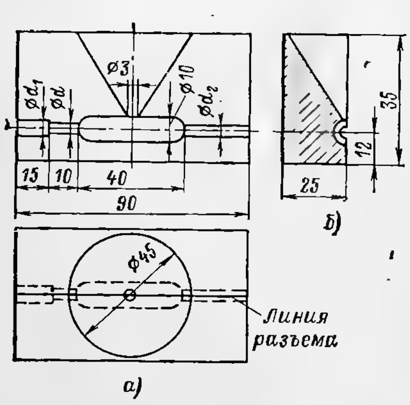


Рис. 31. Разъемная форма для заливки проводов.

а — форма в сборе; *б* — полуформа; *d* — диаметр голого медного провода; d_1 — диаметр изолированного медного провода; d_2 — диаметр алюминиевого провода.

Сварка контактным нагревом. Сварку алюминиевых проводов контактным нагревом производят аналогично сварке медных проводов. Соединение не требует герметизации.

Несоблюдение технологии пайки и сварки влечет за собой разрушение соединений из-за недостаточной механической прочности или в результате коррозии.

Сушка, пропитка и защитное покрытие обмотки. Эксплуатационная надежность отремонтированных электродвигателей определяется не только видом и качеством применяемых материалов для изоляции обмоток, но и правильной пропиткой обмоток. Помимо повышения электрических и механических качеств изоляции пропитка повышает также ее нагревостойкость и влагостойкость, улучшает ее теплопроводность. Сущность пропитки заключается в удалении влаги из пор изоляционных материалов, заполнении пор жидким лаком и сушке лака для перевода его в твердое состояние. При пропитке происходит также цементация витков обмотки между собой

и с витковой и корпусной изоляцией, чем предотвращается возможность относительного перемещения и истирания проводниковой и витковой изоляции.

Покрытие обмоток покровным лаком и эмалью защищает их от воздействия некоторых химических реагентов и от механических повреждений, а также способствует меньшему загрязнению.

Помимо высоких электроизоляционных качеств, лаки не должны размягчаться и быть эластичными при нагреве до температуры, соответствующей их классу нагревостойкости, не оказывать вредного воздействия на медь, сталь и изоляционные материалы, обладать достаточной адгезией не быть токсичными и обладать малой горючестью.

В зависимости от вида изоляции обмоточного провода, а также от исполнения машины выбирают марку лака и эмали, применяют тот или иной режим сушки и пропитки обмоток. Марки лаков и эмалей, а также количество пропиток и покрытий эмалью указаны в табл. 10.

Основное оборудование для сушки и пропитки обмоток перечислено ниже.

1. *Сушильная печь* с температурой нагрева 150—200 °С, имеющая устройство для автоматического регулирования температуры и поддержания ее на заданном

Таблица 10

Наименование	Класс нагревостойкости изоляции				
	А		Е		В
	Нормальное исполнение изоляции	Химостойкое или влагостойкое исполнение изоляции	Нормальное исполнение изоляции	Химостойкое или влагостойкое исполнение изоляции	Нормальное исполнение изоляции
Марка пропиточного лака	МЛ-92	МЛ-92	МЛ-92 МГМ-8	МЛ-92 МГМ-8	МЛ-92 МГМ-8
Количество пропиток лаком	2	3	2	3	2
Марка покровной эмали	ГФ-92ХС ГФ-92ХК ГФ-92ГС	ГФ-92ГС	ГФ-92ХС ГФ-92ХК ГФ-92ГС	ГФ-92ГС	ГФ-92ГС
Количество покрытий эмалью	1	2	1	2	1

Наименование	Класс нагревостойкости изоляции				
	B	F		H	
	Химостойкое или влагостойкое исполнение изоляции	Нормальное исполнение изоляции	Химостойкое или влагостойкое исполнение изоляции	Нормальное исполнение изоляции	Химостойкое или влагостойкое исполнение изоляции
Марка пропиточного лака	МЛ-92 МГМ-8	МГМ-8	МГМ-8 ПЭ-933	К-47к	К-47к
Количество пропиток лаком	3	2	3	2	3
Марка покровной эмали	ГФ-92ГС	ГФ-92ГС	ГФ-92ГС ЭП-92	ПКЭ-22	ПКЭ-22
Количество покрытий эмалью	2	1	2	2	2

уровне. При сушке должны быть обеспечены циркуляция горячего воздуха и удаление паров воды и разбавителей, температура должна быть стабильной во всем объеме печи. Разность температур в рабочей зоне печи не должна превышать 5—8 °С. Несоблюдение этого влечет к недостаточной сушке в зонах с пониженной температурой и чрезмерной сушке в зонах с повышенной температурой.

На рис. 32 изображена сушильная печь, хорошо себя зарекомендовавшая в эксплуатации. Каркас печи имеет двойные стенки, между которыми заложена шлаковата или минеральная вата; стенки облицованы с боков и сверху пеношамотным крипичом. Нагреватели печи, обычно трубчатые, расположены вне печи и рассчитаны на создание температуры в рабочей зоне до 200 °С, что позволяет сушить обмотки и электродвигатели с различными видами изоляции, в том числе и с кремнийорганической.

Сушка изделий производится циркулирующим горячим воздухом. Нагнетаемый вентилятором воздух проходит через нагреватели, поступает в печь через входной патрубок (в середине печи), омывает подвергающиеся сушке изделия и по трубам, расположенным на боковых стенках печи, поступает опять в вентилятор.

Разность температур в рабочей зоне печи не превышает 5 °С.

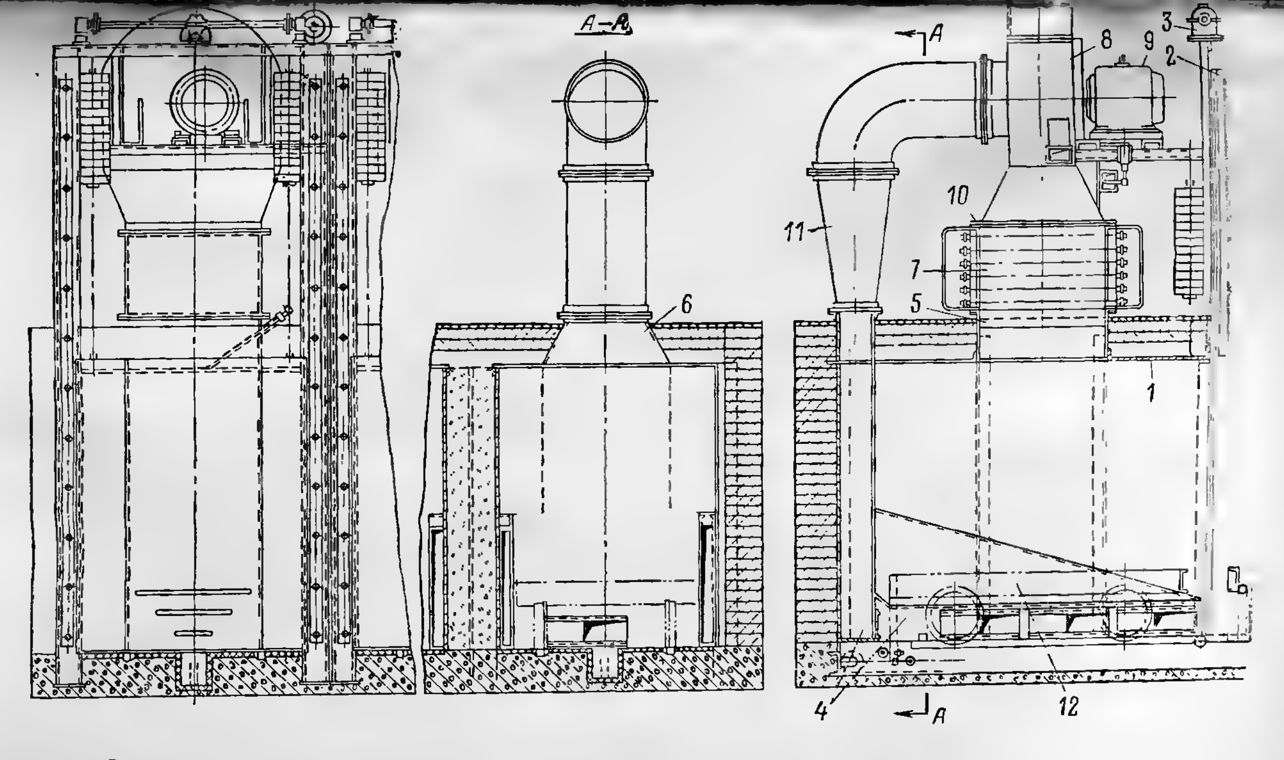


Рис. 32. Сушильная печь.

1 — каркас; *2* — дверь; *3* — механизм подъема двери; *4* — короб; *5* — патрубок калорифера; *6* — патрубок вытяжной; *7* — калорифер; *8* — вентилятор; *9* — электродвигатель; *10* — прокладка; *11* — всос воздуха; *12* — тележка.

Для удаления паров и подсоса свежего воздуха воздухопровод имеет регулируемую задвижку.

Первый период сушки характеризуется выделением из пропитанной обмотки паров растворителей; в это время сушильная печь работает по разомкнутому циклу и нагретый воздух вместе с парами растворителя выбрасывается в атмосферу.

Через некоторое время количество паров растворителя, выделяющегося из обмотки, уменьшается и установка переводится на работу по замкнутому циклу.

2. *Ванна для пропитки лаком* должна быть рассчитана на полное погружение в нее пропитываемых деталей. Вязкость залитого в ванну лака проверяют 1 раз в 5—7 дней. Допускаемая вязкость по вискозиметру ВЗ-4 при 20 °С указана в табл. 11.

Таблица 11

Марка лака	Вязкость лака, с	
	минимальная	максимальная
МЛ-92	20	35
ПЭ-933	25	30
К-47к	17	27
МГМ-8	15	35

Так как растворители лаков постепенно улетучиваются и лак густеет, то периодически в ванну с лаком добавляют растворители, необходимое количество (кг) которых определяют по формуле

$$x = Л \frac{q_1}{q_2} \left(\frac{b_1}{b_2} - 1 \right),$$

где x — добавляемое количество растворителя, кг; $Л$ — количество лака в ванне, кг; q_1 — плотность лака в ванне, г/см³; q_2 — плотность растворителя, г/см³; b_1 — содержание нелетучих в ванне, % по массе; b_2 — желаемое содержание нелетучих после разбавления, % по массе.

Периодически проверяют также пленку, образуемую лаком: опускают в бак полоску электрокартона или бумаги, вынимают ее и дают лаку стечь. Пленка лака должна быть ровной, без просветов. Температуры растворителя и лака должны быть близкими: применение несоответствующих растворителей может повлечь за собой свертывание лаковой основы и порчу всего лака.

Применяют пропиточные ванны различной формы и конструкции; во всех случаях ванна должна быть оборудована специальным подъемно-транспортным устройством в виде тельфера соответствующей грузоподъемности или тали и иметь плотно закрывающуюся крышку. На дне устанавливают решетку с небольшим углом наклона (5—10°), что облегчает выход воздуха из пропитываемых статоров.

Некоторые конструкции пропиточных ванн оборудуются нижней подачей лака из отдельного подъемного резервуара. При такой конструкции ванн узлы и обмотки загружают в порожнюю пропиточную ванну, после чего ванну плотно закрывают крышкой и подают в резервуар с лаком сжатый воздух или инертный газ. Пропиточный лак подается в ванну под давлением, а по окончании пропитки стекает в резервуар самотеком.

При такой конструкции ванны пропитанные обмотки остаются внутри нее (на решетке) до тех пор, пока излишки лака не стекут.

Если в конструкции ванны не предусмотрена нижняя подача лака, пропитанные обмотки и узлы извлекают из ванны и укладывают на наклонную решетку, установленную таким образом, чтобы излишки лака стекали в ванну.

Пропитка обмоток лаками слагается из предварительной сушки до пропитки, собственно пропитки и сушки после пропитки. Предварительная сушка имеет целью удаление влаги из волокнистой изоляции, а также подогрев обмоток для улучшения проникновения лака при последующей пропитке.

После предварительной сушки статор, подогретый до 60—70 °С, погружают в ванну с лаком на 150—200 мм ниже уровня лака и выдерживают в ней до прекращения выделения пузырьков воздуха, что свидетельствует о полном проникновении лака в обмотку.

По окончании первой пропитки пропитываемую деталь вынимают из ванны, устанавливают на решетку для стекания с нее излишка лака, выдерживают на воздухе и загружают в печь для сушки. Число последовательных пропиток и сушек обычно составляет две, а для ответственных машин, работающих в тяжелых условиях эксплуатации, увеличивается до трех.

После каждой пропитки тряпкой, смоченной в растворителе, удаляют лак с тех мест, которые не должны ла-

Таблица 12

Марка лака	Предварительная сушка. Первая ступень. Температура, °С	Предварительная сушка. Первая ступень. Продолжительность, ч	Предварительная сушка. Вторая ступень. Температура, °С	Предварительная сушка. Вторая ступень. Продолжительность, ч	Первая пропитка, мин	Стекание лака, мин	Выдержка на воздухе, мин	Первая сушка. Первая ступень. Температура, °С	Первая сушка. Первая ступень. Продолжительность, ч	Первая сушка. Вторая ступень. Температура, °С	Первая сушка. Вторая ступень. Продолжительность, ч	Вторая пропитка, мин	Стекание лака, мин	Выдержка на воздухе, мин
1	2	3	4	5	6	7	8	9	12	11	12	13	14	15
МЛ-92	125	3—4	—	—	15	15	60	125	8	—	—	10	15	60
МГМ-8	135	3—4	—	—	15	15	60	135	8	—	—	10	15	60
ПЭ-933	100	3—4	—	—	15	15	60	115	2—3	160	4—5	10	15	60
К-47к	125	3	205	3	15	15	60	125	3	205	8	10	15	60

Продолжение табл. 12

Марка лака	Вторая сушка. Первая ступень. Температура, °С	Вторая сушка. Первая ступень. Продолжительность, ч	Вторая сушка. Вторая ступень. Температура, °С	Вторая сушка. Вторая ступень. Продолжительность, ч	Третья пропитка, мин	Стекание лака, мин	Выдержка на воздухе, мин	Третья сушка. Первая ступень. Температура, °С	Третья сушка. Первая ступень. Продолжительность, ч	Третья сушка. Вторая ступень. Теператупа, °С	Третья сушка. Вторая ступень. Продолжительность, ч
1	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26
МЛ-92	125	12	—	—	5	15	60	125	16	—	—
МГМ-8	134	14	—	—	5	15	60	135	16	—	—
ПЭ-933	115	2—3	100	8—10	5	15	60	115	2—3	160	12—16
К-47к	125	3	125	8—10	5	15	60	125	3	205	10—12

кироваться (выводные концы, заточки в корпусе статора и др.), и покрывают их вазелиновым маслом.

Ориентировочные режимы пропитки и сушки обмоток в зависимости от марки лака приведены в табл. 12. Окончательные режимы отрабатывают и уточняют на опытных образцах. Качество пропитки и сушки обмотки проверяют внешним осмотром и замером сопротивления изоляции. Обмотка не должна иметь мест, не заполненных лаком, не должно быть отлипания лака. Сопротивление изоляции обмотки (замеренное мегаомметром на напряжение 500 В) относительно корпуса машины и между обмотками должно быть не менее 1 МОм для обмоток, пропитываемых в лаках МЛ-92, МГМ-8 и ПЭ-933 при температуре 95—100 °С, и 0,5 МОм для обмоток, пропитываемых в лаке К-47к при температуре 180 °С.

Таблица 13

Марка эмали		Вязкость по ВЗ-4 при 20 °С, с	Сушка после первого покрытия эмалью		Сушка после второго покрытия эмалью	
			Температура, °С	Продолжительность, ч	Температура, °С	Продолжительность, ч
ГФ-92ХС		20—35	20	24	—	—
ГФ-92ХК		20—35	20	24	—	—
КО-911		80—180	20	24	—	—
ГФ-92ГС		20—35	110	2—3	110	2—3
ЭП-92		10—22	160	2,5—3	160	5
ПКЭ-22	Первая ступень	20—30	120	5	120	3
	Вторая ступень		—	—	205	12

Примечание. Для ускорения высыхания в эмаль ПКЭ-22 вводят 2% сиккатива №63 (ГОСТ 1003-73).

Лобовые части обмотки покрывают эмалью краскораспылителем при температуре обмотки 60—70 °С. Эмаль наносят ровным слоем до получения гладкой блестящей поверхности. Обмотки, покрытые эмалью холодной сушки, сушат по режиму, указанному в табл. 13. Обмотки, покрытые эмалью горячей сушки, предварительно выдерживают на воздухе в течение 1 ч, затем сушат в печи по режиму, указанному в этой таблице.

Испытания обмотки. Помимо обязательных испытаний электродвигателей по окончании ремонта в соответст-

вии с ГОСТ 183-74 производят промежуточные пооперационные испытания обмотки на различных стадиях ремонта с целью своевременного обнаружения и устранения поврежденных и слабых мест в изоляции, неправильностей в соединении схемы и других дефектов.

Испытания электрической прочности изоляции производят после укладки катушек в пазы, после соединения и пайки, а затем окончательно после пропитки и сушки изоляции обмотки.

После первых двух испытаний изоляции проверяют обмотку на отсутствие витковых замыканий и обрывов, на правильность соединений схемы и маркировки фаз, надежность паяных соединений, так как устранение дефектов в непропитанной обмотке намного проще, чем в пропитанной.

Испытательное напряжение для всыпных обмоток составляет, В:

После укладки обмотки, до соединения и пайки схемы	3000
После соединения и пайки схемы	2700
После пропитки и сушки изоляции	2500

Испытание производят с помощью повышающего трансформатора током промышленной частоты в течение 1 мин. Испытывают изоляцию групп обмотки относительно корпуса электродвигателя и между рядом расположенными группами.

При испытании изоляции групп относительно корпуса выводы всех групп собирают вместе и к ним с помощью изоляционной штанги (щупа) и шлангового провода подводят напряжение от одного из выводов испытательного трансформатора; другой вывод трансформатора присоединяют к заземленному корпусу электродвигателя.

При испытании изоляции между группами (до соединения и пайки схемы) один вывод испытательного трансформатора прикладывают к выводу одной группы, а другой — к выводам групп, расположенных справа и слева от нее. В такой последовательности испытывают все группы обмотки. Испытание после соединения и пайки схемы отличается тем, что вместо изоляции группы испытывается изоляция фазы.

Изоляция считается выдержавшей испытание, если не произошло пробоя или поверхностного повреждения изоляции, фиксируемых соответствующими приборами (место повреждения изоляции не всегда бывает види-

мым). При исправной изоляции показание включенного в цепь амперметра близко к нулю, а показание вольтметра равно значению испытательного напряжения; при пробое изоляции стрелка вольтметра падает до нуля, а стрелка амперметра показывает некоторое значение.

Испытания электрической прочности изоляции должны производиться с соблюдением всех правил техники безопасности, в частности с применением резиновых перчаток и ковриков, подачей звуковых и световых сигналов при включении испытательного напряжения.

Дефекты обмотанных статоров: наличие короткозамкнутых витков, неправильное соединение схемы, неправильное число витков в катушках, плохая пайка и другие — наиболее рационально выявлять специальными аппаратами типов СМ-1, СМ-1Б, СМ-2, СМ-4, ЕЛ-1 и им подобных, разработанных Всесоюзным электротехническим институтом имени В. И. Ленина (ВЭИ). Пользование для этой цели примитивными приспособлениями — подковообразными магнитами, передвигаемыми по окружности статора, шариками, шарикоподшипниками и вертушками и другими недостаточно надежно.

Принцип действия аппаратов СМ и ЕЛ следующий.

К аппарату подсоединяют две обмотки, в которые поочередно посылаются импульсы напряжения высокой частоты. Если обмотки совершенно одинаковы, т. е. равны их полные сопротивления (геометрическая сумма активного и индуктивного сопротивления), то одинаковыми будут также импульсы тока. Это находит свое отображение на экране электронно-лучевой трубки: соответствующие кривые, относящиеся к двум сравниваемым цепям, например к разным фазам обмотки, будут одинаковыми и сольются. Если же в одной из обмоток будет какой-либо дефект, отражающийся на значении ее сопротивления, то импульсы тока, проходящего через испытуемые обмотки, будут различны и на экране трубки будут видны не одна, а две кривые.

Каждому дефекту соответствует своя характерная форма кривой, которая позволяет определить вид неисправности в обмотке.

Принципиальные схемы всех указанных аппаратов одинаковы. В аппарате СМ-2 установлена электронно-лучевая трубка с меньшим экраном; размеры и его масса в 1,5 раза меньше, чем у аппарата СМ-1, что делает его более транспортабельным, хотя четкость показаний осо-

бенно при наблюдении с большого расстояния хуже, чем у аппарата СМ-1. Аппарат СМ-4 несколько отличается от аппаратов СМ-1 и СМ-2 своей схемой. Кроме того, он не имеет вращающего устройства для переключения испытуемых обмоток. Подробные характеристики и особенности каждого типа аппарата, а также способы пользования указаны в проспекте-каталоге, прилагаемом к аппарату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Бабенко Д. А., Тепленко С. И., Чибишев Л. Д.** В помощь электрику—обмотчику асинхронных электродвигателей. М., «Энергия», 1965. 256 с.

2. **Бернштейн Л. М.** Изоляция электрических машин общепромышленного применения. М., «Энергия», 1971. 368 с.

3. **Виноградов Н. В.** Обмотчик электрических машин. М., «Высшая школа», 1973, 344 с.

4. **Готман П. Е., Березин В. Б., Хайкин А. М.** Электротехнические материалы. М., «Энергия», 1969. 544 с.

5. **Кокорев А. С.** Справочник молодого обмотчика электрических машин. М., «Высшая школа», 1969, 336 с.

6. **Маршак Е. Л.** Ремонт обмоток статоров электрических машин переменного тока. М., «Энергия», 1966. 112 с

7. **Маршак Е. Л., Уманцев Р. Б.** Схемы обмоток статоров. М., «Энергия», 1967. 86 с.

8. **Маршак Е. Л., Уманцев Р. Б.** Ремонт электрических машин общепромышленного применения. М., «Энергия», 1972. 280 с.

9. **Обмоточные** данные асинхронных двигателей. Под ред. П. И. Цибулевского, изд. 2-е, доп. М., «Энергия», 1971. 392 с.

10. **Слоним Н. М.** Алюминиевые провода при ремонте асинхронных двигателей. М., «Энергия», 1973. 136 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Евсей Львович Мвршвк

РЕМОНТ ВСЫПНЫХ ОБМОТОК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Редактор издательства И. П. Березина
Обложка художника
А. М. Кувшинникова
Технический редактор Т. А. Маслова
Корректор Г. Г. Желтова

Сдано в набор 31/X 1974 г.
Подписано к печати 10/X 1975 г. Т-13199
Формат $84 \times 108^1/_{32}$ Бумага типографская № 2
Усл. печ. л. 4,62+вкл. Уч.-изд. л. 4,9
Тираж 30 000 экз. Зак. 980 Цена 24 коп.

Издательство «Энергия»,
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10.

Московская типография № 10 Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета
Министров СССР по делам издательства,
полиграфии и книжной торговлн.
Москва, М-114, Шлюзовая наб., 10

Цена 24 коп.